



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CAMPUS UFRJ-MACAÉ  
Professor Aloísio Teixeira



---

## FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

JULIÃO FERREIRA DE SOUSA

Macaé  
Outubro/2018





## Fabricação e análise de tijolos de solo-cimento

Julião Ferreira de Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, como requisito parcial para aquisição do título de engenheiro civil.

Orientador: Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Coorientador: Leandro Torres Di Gregorio



De Sousa, Julião Ferreira

Fabricação e análise de tijolos de solo-cimento /  
Julião Ferreira de Sousa – Macaé: UFRJ/Campus  
UFRJ – Macaé 2018.

XII, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Coorientador: Leandro Torres Di Gregorio

Projeto de Graduação – UFRJ/Macaé/Curso de  
Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas p. 80-81.

1. Introdução. 2. Alguns conceitos. 3. Campanha de  
ensaios. 4. Apresentação e análise dos resultados. 5.  
Conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

I. Tijolo modular, II. Solo-cimento, III. Pó de brita,  
IV. Painéis de Alvenaria.

# FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

JULIÃO FERREIRA DE SOUSA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – CAMPUS MACAÉ, COMO REQUISITO PARCIAL PARA AQUISIÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Macaé, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2018

Examinado por:

---

Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Leandro Torres Di Gregório  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Leandro Tomaz Knopp  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter-me dado o recurso e força necessários para chegar até aqui.

Ao professor Gustavo Guimarães pelo apoio.

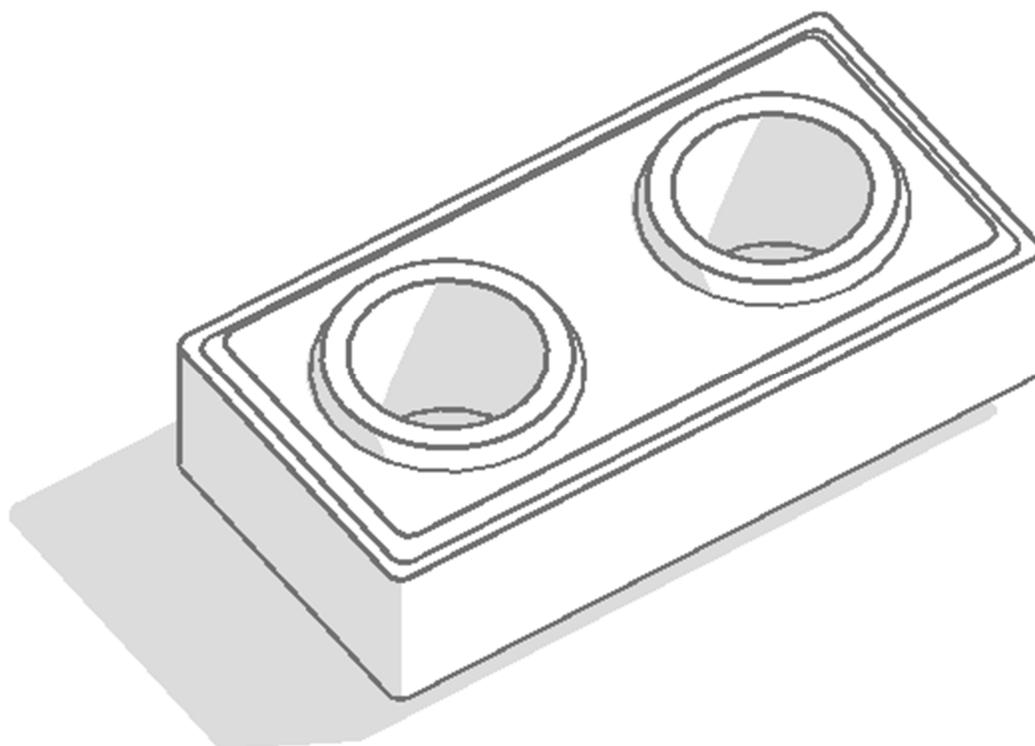
A João Vitor Maia, Reinaldo Santos e Yuri Berlink pela amizade e pela ajuda mais que essencial na geração de material para a realização deste trabalho.

A toda equipe do projeto e todos aqueles envolvidos direta e indiretamente na realização do mesmo.

Agradeço a todos os meus irmãos de fé pelas orações e cuidado.

Agradeço a Carlos Ribeiro, Nelma Ferraz, Pedro Antônio e Maria Eduarda por me receberem de portas abertas e por todo o apoio que me deram.

Agradeço, por fim, aos meus pais Deusdete Ferreira Santos e Angela Magna de Sousa Santos, as minhas irmãs Diana de Sousa Santos Teixeira e Mônica de Sousa Santos, a meu irmão Emanuel Ferreira de Sousa, meus avós Arnaldo Antônio de Sousa e Nilza Costa Ferraz e a toda minha família por tudo que representa na minha vida, pela compreensão e incentivo ao longo do caminho que me trouxe até aqui.



Resumo do Projeto de Graduação apresentado à UFRJ – Macaé como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

## FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Julião Ferreira de Sousa

Outubro/2018

Orientador: Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Coorientador: Leandro Torres Di Gregorio

Curso: Engenharia Civil

Neste trabalho, através de uma metodologia experimental, foram analisados aspectos de tijolos modulares compostos por misturas binárias e ternárias de solo-cimento e solo-cimento com pó de brita produzidos em prensa manual, com a finalidade de se obter parâmetros e diretrizes que visam um melhor desempenho do material. O solo utilizado na fabricação dos tijolos foi caracterizado através dos ensaios de granulometria, limites de Atterberg, absorção e retração. Os tijolos produzidos foram submetidos à análise dimensional além de terem suas resistência mecânica e durabilidade testados. Também foram construídos painéis de alvenaria com o objetivo de verificar o comportamento das paredes em relação à compressão e comparar com os valores obtidos nos tijolos individualmente. Os benefícios da pesquisa permitem relacionar a tecnologia da fabricação de tijolos de solo-cimento com o contexto de construção sustentável e o aproveitamento de resíduos industriais, além de informações para a elaboração de um portfólio para futuras práticas laboratoriais e produção de tijolos modulares de solo-cimento.

Palavras-chave: Tijolo modular, Solo-cimento, Pó de brita, Painéis de Alvenaria.

Abstract of the Undergraduate Project presented to UFRJ - Macaé as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## FABRICATION AND ANALYZE OF SOIL-CEMENT BRICKS

Julião Ferreira de Sousa

October/2018

Advisor: Gustavo Vaz de Mello Guimarães.

Co-advisor: Leandro Torres Di Gregorio

Course: Civil Engineering

On this work, through an experimental methodology, aspects of modular bricks composed of binary and ternary mixes of soil-cement and soil-cement with stone powder produced in a manual press has been analyzed, in order to obtain parameters and directives that look to a better performance of the material. The soil used in the fabrication of the bricks went characterized by the the tests of granulometry, Atterberg limites, absorption and retraction. The bricks that have been produced were submitted to dimensional analysis as well as mechanical resistance and durability. Masonry panels also were built in aiming to verify the behavior of the walls in relation to the compression and compare it to the values obtained from the bricks individually. The benefits of the research allow to relate to the technology of the fabrication of soil-cement bricks with the context of sustainable construction and the use of industrial residues, as well as information to elaborate of a portfolio for future laboratorial practice and production of modular soil-cement bricks.

Keywords: Modular brick, Soil-cement, Stone powder, Masonry Panel

## SUMÁRIO

1.	Introdução .....	14
1.1.	Objetivos .....	15
1.2.	Metodologia.....	15
1.3.	Estrutura do Trabalho.....	15
2.	Alguns conceitos .....	16
2.1.	Solo .....	16
2.1.1.	Origem.....	16
2.1.2.	Propriedades dos solos .....	18
2.1.3.	Composição química e mineralógica dos solos.....	19
2.1.4.	A estrutura do solo .....	19
2.1.5.	Compactação do solo.....	20
2.2.	Cimento Portland.....	21
2.3.	Pó de brita .....	24
2.4.	Estabilização de Solos .....	25
2.4.1.	Solo-cimento.....	26
2.4.2.	Fatores que condicionam a qualidade da mistura de solo-cimento .....	27
2.4.3.	Métodos de dosagem da mistura de solo-cimento .....	28
2.5.	O solo como material de construção .....	29
2.6.	Tijolo de solo-cimento.....	31
3.	Campanha de Ensaios .....	34
3.1.	Solo .....	34
3.2.	Outros materiais utilizados .....	35
3.3.	Ensaios pré-fabricação .....	35
3.3.1.	Granulometria.....	35
3.3.2.	Limites de Atterberg .....	39
3.3.3.	Densidade real dos Grãos.....	43
3.3.4.	Retração .....	44
3.4.	Fabricação dos tijolos de solo-cimento.....	46
3.5.	Ensaios pós-fabricação .....	52
3.5.1.	Análise dimensional.....	53
3.5.2.	Ensaio de resistência à compressão .....	54
3.5.3.	Ensaio de Absorção .....	57

3.5.4. Ensaio de Durabilidade .....	57
3.5.5. Compressão de paredes de pequeno porte .....	60
4. Apresentação e análise dos resultados.....	65
4.1. Granulometria.....	65
4.2. Limites de Atterberg .....	67
4.3. Densidade real dos grãos.....	68
4.4. Ensaio de retração .....	69
4.5. Análise dimensional.....	71
4.6. Resistência à compressão .....	71
4.7. Absorção .....	73
4.8. Durabilidade .....	73
4.9. Compressão de paredes de pequeno porte .....	76
5. Conclusões e sugestões para futuras pesquisas .....	78
REFERÊNCIAS.....	80
Apêndice 1 .....	83
Apêndice 2 .....	86
Apêndice 3 .....	89
Apêndice 4 .....	90

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Estrutura do Solo. Fonte: GRANDE (2003).....	16
Figura 2: Horizontes do Solo. Fonte: PENA (2017).....	17
Figura 3: Pó de brita.....	24
Figura 4: Britadores de eixo vertical tipo Barmac. Fonte: METSO (2018).....	25
Figura 5: Construção em Taipa. Fonte: NYGAARD (2011).....	30
Figura 6: Construção em adobe. Fonte: ANDRADE, OLIVEIRA, EGYPTO (2012).....	31
Figura 7: Localização das jazidas de solo. Fonte: Google maps (acesso em 11 de junho de 2018).....	34
Figura 8: Coleta de solo.....	34
Figura 9: Solo 1 e solo 2, respectivamente.....	35
Figura 10: Jogo de peneiras e balança utilizadas no ensaio de peneiramento	36
Figura 11: Aparelhagem utilizada no ensaio de sedimentação.....	37
Figura 12: Ensaio de sedimentação: Execução.....	38
Figura 13: os equipamentos utilizados para a realização do limite de liquidez.	40
Figura 14: Moldagem da amostra no aparelho de Casagrande, aplicação dos golpes e ranhura na amostra de solo.....	41
Figura 15: Placa de vidro esmerilhado e gabarito metálico.....	42
Figura 16: Limite de plasticidade: Execução do ensaio.....	42
Figura 17: Alguns dos equipamentos utilizados no ensaio.....	43
Figura 18: Determinação da densidade real dos grãos: Execução do ensaio..	44
Figura 19: Caixa de madeira, óleo e pincel utilizado na lubrificação.....	45
Figura 20: Execução do ensaio de retração.....	46
Figura 21: Prensa manual e destorroador mecânico de solo (Fonte: VIMAQ PRENSAS).....	46
Figura 24: Cimento, cal e solo utilizados na mistura. Na ocasião, 9,2, 1,2 e 54 litros, respectivamente.....	48
Figura 25: Mistura dos componentes solo, cimento, cal e água e destorroamento da mistura.....	48
Figura 26: Processo de prensagem da mistura para fabricação de tijolos.....	50
Figura 27: Cura dos tijolos na caixa d'água.....	51
Figura 28: Ensaio com corpo de prova de tijolo único.....	55
Figura 29: Ensaio com corpo de prova composto por duas metades de tijolo justapostas e coladas com pasta de cimento.....	55
Figura 30: Ensaio com corpo de prova composto por dois tijolos justapostos e colados com pasta de cimento.....	56
Figura 31: Numeração, imersão e escovação dos tijolos ensaio de durabilidade.....	59
Figura 32: Determinação do volume dos tijolos.....	59
Figura 33: Estufa com corpos de prova.....	60
Figura 34: Processo de fabricação do graute. Destorroamento do solo; Peneiramento; Solo, brita e cimento em masseira; Mistura dos componentes; Adição de água na mistura; Graute com consistência adequada.....	61

Figura 35: Processo de montagem dos painéis. Marcação dos tijolos na metade para corte; Montagem (parte 1); Montagem (parte 2); Inserção de graute; Adensamento; Resultado final.....	62
Figura 36: Verificação dimensional dos painéis. ....	63
Figura 37: Posição dos painéis na prensa. ....	64
Figura 38: Monitoramento da compressão do painel. ....	64
Figura 39: Ruptura do painel.....	65
Figura 40: Curva granulométrica dos solos 1 e 2.....	66
Figura 41: Curva granulométrica do pó de brita .....	67
Figura 42: Curva de compactação dos solos 1 e 2 .....	68
Figura 43: Ensaio de retração do solo: Resultado.....	70
Figura 44: Medição das trincas e afastamentos.....	70
Figura 45: Resultado das medições do ensaio de retração. ....	70
Figura 46: Ensaio de Durabilidade: Variação de volume dos tijolos de solo-cimento.....	74
Figura 47: Ensaio de Durabilidade: Variação da massa dos tijolos.....	75
Figura 48: Ensaio de Durabilidade: Variação do volume dos tijolos de solo cimento com adição de pó de brita.....	75
Figura 49: Ensaio de Durabilidade: Variação da massa dos tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos (NBR 6502/1995). .....	18
Tabela 2: Composição e proporções aproximadas dos componentes do cimento portland antes da hidratação. Adaptado de BARZELLAY (2015).....	22
Tabela 3: Critérios para a seleção de solos de acordo com a NBR 10833/2012.....	33
Tabela 4: Critérios estabelecidos para tijolos de solo-cimento na NBR 8491/2012.....	33
Tabela 5: Tijolos de solo-cimento fabricados com traço 1:10.....	51
Tabela 6: Programação dos ensaios indicando a quantidade de tijolos para cada ensaio em determinadas idades.....	53
Tabela 7: Tipos e dimensões nominais (mm).....	53
Tabela 8: Cronograma de Ensaios de Resistência à Compressão .....	56
Tabela 9: Resultados do ensaio de limite de liquidez para solo 1 .....	67
Tabela 10: Resultados do ensaio de limite de liquidez para solo 2 .....	67
Tabela 11: Resultados do ensaio de determinação da densidade real dos grãos. ....	69
Tabela 12: Dimensões nominais dos tijolos (mm).....	71
Tabela 13: Resultados do ensaio de compressão para tijolos de solo-cimento.....	72
Tabela 14: Resultados do ensaio de compressão para tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita.....	72
Tabela 15: Ensaio de absorção solo-cimento – Resultados.....	73
Tabela 16: Resultados das resistências dos painéis de alvenaria. ....	76

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	38
Equação 2 .....	65
Equação 3 .....	65
Equação 4 .....	69
Equação 5 .....	73
Equação 6 .....	73
Equação 7 .....	73
Equação 8 .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento é parte fundamental de um projeto de engenharia e, tendo em vista o crescente avanço científico e tecnológico dos mecanismos que auxiliam esse dimensionamento, é de suma importância que os parâmetros que influenciam o comportamento – dentre eles, a resistência – dos elementos construtivos sejam estudados e quantificados para melhor adequação de um modelo físico com o real desses projetos.

Um método construtivo que merece estudos mais aprofundados e que vem ganhando destaque nas últimas décadas é a alvenaria de tijolos de solo-cimento.

Os tijolos de solo-cimento são assim chamados por sua composição envolver, basicamente, esses dois componentes. Eles compõem um sistema construtivo de alvenaria de vedação que pode ser estrutural desde que associada a uma estrutura de concreto, como afirma o engenheiro Francisco Casanova, então professor do programa de engenharia da COPPE (Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação da UFRJ) (FIQUEROLA, 2004). Esse sistema é alternativo ao sistema convencional de alvenaria com blocos cerâmicos e à alvenaria estrutural com blocos de concreto, mostrando-se mais econômico do que os mesmos na construção de moradias populares de um pavimento, de acordo com PENTEADO E MARINHO (2011).

Alguns estudos também apontam a possibilidade de utilização de diversos resíduos – industriais e orgânicos – como matéria prima adicional na fabricação desses tijolos, evidenciando o potencial não só econômico, mas também sustentável dos mesmos. Dentre esses materiais destacam-se resíduo de marmoraria, de demolição, casca de arroz, bagaço de cana, pó de brita etc. Este último sendo também objeto de pesquisa do presente trabalho.

Esse método construtivo também possibilita a economia com transporte de materiais para a obra pois que permite a fábrica se deslocar até a mesma, uma vez que os referidos tijolos são fabricados em prensas manuais ou hidráulicas, geralmente móveis, que lhes conferem facilidade de transporte. O solo necessário à fabricação dos tijolos também pode ser do próprio local ou das proximidades, sendo necessário estudos das características do solo e a permissão das devidas entidades ambientais.

Benefícios sociais também podem ser adquiridos através da construção com alvenaria de tijolos de solo-cimento. A integração e capacitação da comunidade como forma de mutirão para a fabricação e construção de moradias populares tem sido implementada em cidades como Contagem e Uberlândia (MG), através dos projetos Habitacional Sapucaias e Ação Moradia, respectivamente, obtendo resultados extremamente positivos uma vez que proporciona capacitação profissional aos residentes ao mesmo tempo que reduz o custo com mão-de-obra.

Outra vantagem advinda do método é o controle de perdas, uma vez que a alvenaria modular minimiza o desperdício graças ao fato de os tijolos serem encaixados e assentados com pouca ou nenhuma argamassa, sendo essa substituída por uma cola especial a base de PVA e os furos presentes em sua estrutura permitirem

a passagem de tubos de instalações elétricas e hidráulicas como afirma o professor Francisco Casanova (FIQUEROLA, 2004), ANGST (2013) e PENTEADO E MARINHO (2011), evitando assim a necessidade de retrabalho com cortes e quebras.

Apesar disso, no Brasil, a utilização de solo-cimento na construção de habitações (como componente de alvenaria) foi desaparecendo na proporção que outros materiais mais industrializados surgiram no mercado. Dessa forma, sua utilização é mais expressiva em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases de nossas rodovias são feitas de solo-cimento compactado), reforços e melhorias de solos, barragens e contenções, de acordo com GRANDE (2003).

Por fim, o estudo dessa tecnologia poderá apontar tendências no mercado da construção civil brasileira, além de fomentar a pesquisa por técnicas de construção mais sustentáveis.

## **1.1. OBJETIVOS**

Este trabalho tem por objetivo analisar as características de tijolos de solo-cimento e solo-cimento com adição de pó de brita produzidos em prensa manual além da resistência à compressão de painéis de alvenaria erguidos com os mesmos, seu desempenho e aplicabilidade na construção civil.

## **1.2. METODOLOGIA**

A metodologia do trabalho consiste, basicamente, em cinco etapas distintas:

- Estudo dos materiais empregados na confecção de tijolos de solo-cimento;
- Ensaio de caracterização do solo;
- Moldagem dos tijolos em prensa manual;
- Análise dimensional e ensaios de resistência à compressão, absorção e durabilidade dos tijolos produzidos;
- Ensaio de compressão de painéis de alvenaria.

## **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Segue-se a esta introdução o segundo capítulo, no qual são apresentados os materiais necessários à fabricação de tijolos de solo-cimento e do pó de brita, suas origens, propriedades e características.

No terceiro capítulo são abordados os materiais utilizados especificamente no decorrer do trabalho, suas características e a metodologia adotada para a classificação dos mesmos

Já no quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios, tais como a análise e interpretação dos mesmos.

No quinto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho, juntamente com sugestões para futuras pesquisas.

## 2. ALGUNS CONCEITOS

### 2.1. SOLO

Segundo PINTO (Pinto, 2000), solo é um sistema trifásico composto por um conjunto de partículas com água (ou qualquer outro líquido) e ar nos espaços intermediários, como representado na Figura 1.

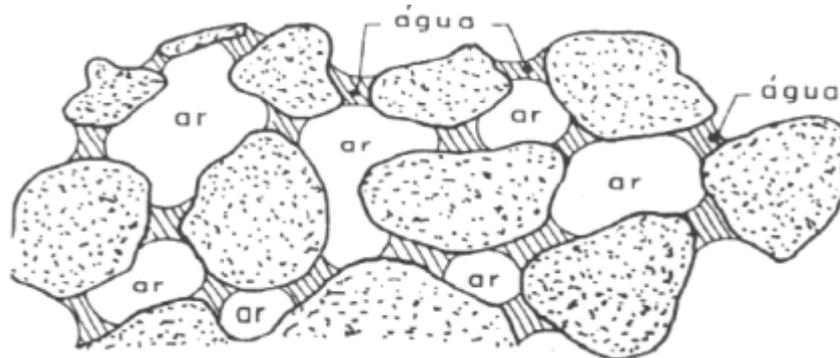


Figura 1: Estrutura do Solo. Fonte: GRANDE (2003).

As partículas, de maneira geral, encontram-se livres para deslocar entre si. Pequenas cimentações podem ocorrer entre elas, mas de forma muito mais fraca da que pode ser encontrada nos cristais de uma rocha, metal ou agregados de um concreto. Essa liberdade de descolamento das partículas sólidas e, por conseguinte, seu movimento faz com que o comportamento do solo se afaste do mecanismo dos sólidos idealizados na Mecânica dos Sólidos Deformáveis, na qual se fundamenta a Mecânica das Estruturas considerada na Engenharia Civil. A Mecânica dos Solos poderia ser adequadamente incluída na Mecânica dos Sistemas Particulados (LAMBE E WHITMAN, 1969, apud PINTO, 2000).

#### 2.1.1. ORIGEM

Os solos são originados da decomposição de rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. As rochas são agregados de minerais ligados por intensas forças coesivas e permanentes. Um mineral, por sua vez, é todo elemento químico que preenche os seguintes critérios:

- é constituinte da crosta terrestre;
- seu processo de formação é natural e inorgânico;
- sua composição química e suas propriedades físicas são bem definidas ou dentro de limites definidos;
- sua estrutura atômica ou molecular é organizada.

Quanto a sua formação, as rochas são classificadas em três grupos:

- rochas ígneas ou magmáticas;
- rochas sedimentares;
- rochas metamórficas.

Ainda segundo PINTO (2000), a decomposição das rochas é decorrente do intemperismo, que pode ser físico ou químico. Variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, atacando quimicamente os minerais. O congelamento da água nas trincas, entre outros fatores, exerce elevadas tensões, do que decorre maior fragmentação dos blocos. A precipitação somada à presença da fauna e flora promove o ataque químico, através da hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação etc. O conjunto desses processos, que são ainda mais atuantes em climas tropicais - como é o caso do Brasil, especialmente Macaé - leva à formação dos solos que, em consequência, são misturas de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e pela composição química. A maior ou menor concentração de cada tipo de partículas em um solo depende da composição química da rocha que lhe deu origem.

Este fenômeno é ainda mais exacerbado em solos residuais tropicais. Nestes solos, o perfil completo do intemperismo constitui camadas ou perfis na crosta terrestre denominadas *horizontes A, B e C*. Uma camada superficial de matéria orgânica (O) precede o horizonte A (solo superficial), caracterizado pelo acúmulo de materiais dissolvidos e suspensos. O horizonte B (subsolo) é caracterizado por conter materiais orgânicos em mistura com óxidos ferrosos e argilas, além de ser a faixa de transição para o horizonte C. Este, por sua vez, é o material de origem residual. E, finalmente, a rocha-mãe. A Figura 2 ilustra os horizontes do solo.

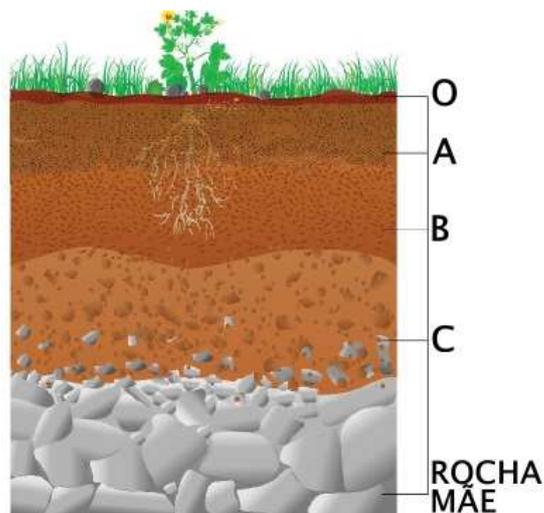


Figura 2: Horizontes do Solo. Fonte: PENA (2017).

De acordo com GRANDE (Grande, 2003), o conhecimento do perfil do solo e de sua subdivisão em horizontes permite algumas observações relevantes ao uso prático do solo-cimento, quanto ao emprego dos solos provenientes desses perfis. O horizonte A, em geral, possui espessura em torno de 20 e 30 cm e sua cor é cinza escura. Nesse horizonte podem existir celulose e húmus. A celulose é inerte, porém o húmus é um ácido orgânico que tem grande afinidade química com a cal livre (CaO) liberada na hidratação do cimento e, mesmo em baixas concentrações, pode afetar a resistência do material. Em alguns casos, quando não há mais alternativas, é recomendável adicionar cal nos solos do horizonte A antes da adição de cimento, porém esse procedimento envolve outras variáveis como o teor de cal necessário e o custo dessa operação.

Os solos do horizonte B são, em geral, argilosos com predominância de caulinita, uma vez que esse horizonte se forma em ambientes de boa drenagem. São solos de difícil pulverização (destorroamento) e isso é um grande problema na homogeneização da mistura de solo-cimento.

No Horizonte C os solos são arenosos e de fácil pulverização, o que indica preferência em emprego em solo-cimento. Mesmo assim, devido à sua composição mineralógica de origem, que pode conter partículas friáveis, pode ser necessário um estudo de dosagem antes da utilização.

### 2.1.2. PROPRIEDADES DOS SOLOS

De acordo com CHIOSSI (Chioffi, 2015), o comportamento dos solos está, entre outras coisas, ligado ao tamanho das partículas que o compõem. De acordo com a granulometria, os solos são classificados em (por ordem decrescente de tamanho dos grãos):

- pedregulhos ou cascalhos;
- areias;
- siltes;
- argilas.

Outro fator muito importante é o formato dos grãos:

- Pedregulho, areias e siltes possuem dimensões aproximadas em todas as direções e podem, de acordo com a intensidade de transporte, ser angulosas ou esféricas.
- Argilas, em que as partículas são microscópicas, apresentam grãos lamelares ou placoides, ou seja, duas dimensões predominam sobre a terceira.

Existem várias classificações granulométricas do solo. A classificação da NBR 6502/1995: “Rochas e Solos”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), está disposta na Tabela 1:

*Tabela 1: Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos (NBR 6502/1995).*

<b>Fração</b>	<b>Limites</b>
Matacão	Entre 25 cm e 1 m
Pedra	Entre 7,6 cm e 25 cm
Pedregulho	Entre 4,8 mm e 7,6 cm
Areia grossa	Entre 2 mm e 4,8 mm
Areia média	Entre 0,42 mm e 2 mm
Areia fina	Entre 0,05 mm e 0,42 mm
Silte	Entre 0,005 mm e 0,05 mm
Argila	< 0,005 mm

### **2.1.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS SOLOS**

O comportamento mecânico de um solo depende, no geral, da granulometria, ou seja, a distribuição e configuração dos diversos tamanhos de partículas constituintes do solo.

Segundo SENÇO (2007), os grãos maiores do solo, como os pedregulhos e areias, são constituídos por fragmentos de rocha que podem incluir em sua composição um ou mais minerais. Os grãos de areia são compostos por minerais resistentes ao intemperismo, principalmente de quartzo ( $\text{SiO}_2$  cristalina). E, de acordo com GRANDE (2003), solos arenosos necessitam de menores teores de cimento para a sua estabilização pois apresentam o melhor comportamento mecânico.

As partículas de argila são também constituídas de um único mineral que, em geral, pertence a um dos seguintes grupos: caulinita, illita e montmorilonita. Esses minerais possuem uma estrutura cristalina lamelar.

A natureza mineralógica dos grãos não exerce influência sobre as propriedades das frações mais grossas do solo, como as areias e pedregulhos, porém, devido à própria natureza dos minerais da argila, bem como seu reduzido tamanho, estas partículas apresentam atividade mineralógica coloidal pronunciada, decorrendo daí a influência da natureza mineralógica dos grãos nas propriedades das frações mais finas do solo.

Devido a sua estrutura iônica, a caulinita é menos suscetível a variações de volume por absorção de água e possui menor capacidade de troca catiônica que as illitas e, por fim, as montmorilonitas são as mais instáveis pois possuem grande quantidade de cargas elétricas disponíveis para reagir com água, expandindo-se em mais de uma dezena de vezes.

As variações de volume por absorção de água estão diretamente ligadas aos Limites de Consistência (Limites de Atterberg) do solo, que são parâmetros que descrevem os estados físicos do solo.

### **2.1.4. A ESTRUTURA DO SOLO**

De acordo com SENÇO (2007), a fase líquida do solo não deve ser encarada de forma independente porque a água se apresenta nos solos sob diversos aspectos e propriedades que podem variar totalmente da água livre, apresentando-se da forma de:

- água de constituição: é um dos componentes da argila, cuja eliminação ou variação percentual acarreta alteração nas propriedades da mesma. Não pode ser removida exceto por elevadas temperaturas (500 °C a 600 °C);
- água adsorvida: constitui-se na película fixada na superfície dos grãos, presas através de forças intermoleculares;
- água higroscópica: se encontra no solo, ao ar livre, ou seja, em equilíbrio com o vapor de água da atmosfera úmida, e é cedida em uma atmosfera seca;

- água capilar (ou água livre): é aquela que, nos solos de grãos finos, sobe pelos interstícios capilares deixados pelas partículas sólidas, além do plano determinado pela água livre.

A capilaridade constitui uma das mais importantes manifestações da existência das três fases: sólido, líquido e gasoso. A coesão e o fenômeno de contração das argilas são explicados através da ação capilar existente nos solos.

“A compreensão sobre a relevância da água na configuração da estrutura do solo permite equacionar incidências patológicas bastante características do solo cimento, como por exemplo, o surgimento de fissuras devido à retração por secagem.” (GRANDE, 2003).

### **2.1.5. COMPACTAÇÃO DO SOLO**

De acordo com GUIMARÃES (2016), a compactação é um dos métodos de melhora de solo mais populares e econômicos, sendo este processo o mais utilizado em todo o mundo. Com o objetivo de aumentar a rigidez e a resistência do solo, o processo de compactação busca basicamente aumentar o contato entre grãos reduzindo os índices de vazios. É importante ressaltar que as quantidades de partículas sólidas e água são constantes. O aumento de massa específica está relacionado com a eliminação de ar dos vazios do solo.

Ralph R. Proctor, observou, em 1933, na Califórnia, que a densidade atingida na operação de compactação dependia da umidade do solo. Essa observação deu início a toda uma técnica de compactação e a prévia determinação de qual a umidade mais conveniente para se obter um máximo de compactação para uma determinada energia.

A obtenção da maior massa específica aparente de solo por meio da aplicação de energia mecânica implica em se obter a maior quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, resultando assim, no aumento de resistência desse solo.

Proctor observou que aumentando-se a quantidade de água (mantendo-se a energia de compactação), a massa específica aparente vai aumentando até que os vazios não sejam mais preenchidos para aquela energia. Nesse ponto, obtém-se a máxima massa específica aparente seca que pode ser atingida com aquela energia de compactação.

Continuando-se a adicionar água, a mesma não encontrará lugar nos vazios, e parte da energia de compactação aplicada será absorvida pelo excesso de água, que desenvolverá pressões que tendem a separar as partículas de solo, e, por conseguinte, reduzir a massa específica aparente seca pelo aumento de vazios. Prosseguindo com o acréscimo de água, a massa específica aparente continuará a decrescer até que o excesso de água não permita a compactação. Na prática da engenharia de estradas esse fenômeno é conhecido como “solo borrachudo”.

O conhecimento do comportamento do solo no processo de compactação e compactado é de fundamental importância para projetos envolvendo a utilização de solos. Sua importância está ligada a razões de segurança, aponta SENÇO (2007).

## 2.2. CIMENTO PORTLAND

O termo cimento é proveniente do termo em latim *caementun* que significa “pedaços de pedras ásperas e não entalhadas”.

Segundo BARZELLAY (2015, p. 17)

Cimento Portland é a denominação convencionalmente mundialmente para o material em pó, fino e com diferentes tons da cor cinza, o qual apresenta propriedades aglutinantes quando adicionado a água, também conhecido apenas como ‘cimento’.

Ele é aglomerante porque possui a capacidade de unir outros materiais e hidráulico porque reage quimicamente com a água ao entrar em contato com a mesma.

Já de acordo com a Especificação brasileira EB-1, da ABNT, citada por SENÇO (2007), o cimento é o aglomerante obtido pela pulverização do clínquer resultante da calcinação até fusão incipiente, 20% a 30% de fase líquida, de uma mistura íntima e convenientemente proporcionada de materiais calcários e argilosos, sem adição, após a calcinação, de outras substâncias a não ser água e gesso.

A *American Concrete Institute* – ACI, define o cimento Portland como um

aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer Portland, que é constituído essencialmente de aluminatos e silicatos de cálcio hidráulicos, com adição de pequenas porcentagens de sulfato de cálcio – gesso - e, usualmente, com grandes porcentagens de Escória Granulada de Alto Forno (EGAF), de pozolanas e/ou filler calcário.

As propriedades e características finais do cimento Portland estão diretamente relacionadas com as características e propriedades das matérias primas e do processo de produção. Como fora mencionado, o cimento Portland é composto do clínquer Portland com o gesso e mais adições minerais. Em geral, são as adições minerais que definem os diferentes tipos de cimento Portland.

O gesso é adicionado ao clínquer Portland em porcentagens de 2 a 6% antes da moagem com o objetivo de controlar o tempo de enrijecimento do cimento. Se adicionado em pequenas quantidades, o cimento se enrijecerá muito rápido. Se adicionado em elevadas quantidades poderá promover fissuras na pasta de cimento endurecida.

As adições minerais são inseridas ao clínquer – após a queima no forno rotativo – e moídos finamente. Elas apresentam propriedades aglomerantes quando entram em contato com água e determinados compostos hidratados do cimento. São adições minerais as pozolanas – como a cinza volante e sílica ativa - e a EGAF. Geralmente

aumentam a resistência mecânica a longo prazo e a durabilidade da pasta de cimento, mas reduzem a resistência inicial.

A EGAF é um resíduo industrial obtido na produção do ferro-gusa. Pode-se considerar que é um material cimentício cujo enrijecimento se dá muito lentamente. O principal benefício proporcionado pela EGAF adicionada ao cimento Portland é o aumento da resistência aos sulfatos.

As pozolanas são resíduos industriais de ferro-silício e silício metálico, materiais naturais ou de beneficiamento de insumos agrícolas como cinza de casca de arroz ou cinza de bagaço de cana. São formados por silicatos e/ou sílica e reagem com a cal formando compostos que aumentam a resistência mecânica e a durabilidade em função do grau de moagem e composição química cristalográfica, além de reduzirem o calor de hidratação e melhorar a trabalhabilidade do cimento.

Filler é um composto inerte proveniente de rochas calcárias ( $\text{CaCO}_3$ ) que, quando moído em partículas suficientemente finas conduz a efeitos vantajosos para a pasta de cimento, como aumento da fluidez e compactidade, reduz a permeabilidade, a exsudação do cimento e a fissuração.

O processo de fabricação do cimento Portland consiste, resumidamente, em moer ao mesmo tempo em que se mistura as matérias primas em suas determinadas proporções até que se adquira um pó muito fino e homogêneo que, em seguida é levada ao forno rotativo – processo chamado de clinquerização. Após a saída do forno o material é esfriado e novamente moído, dessa vez adicionando gesso ou outros minerais.

O clínquer, quando reduzido a pó, tem composição química específica e propriedades físicas de cimento contendo basicamente uma série de compostos anidros, dos quais os principais são:

- Silicato tricálcico, ou alita ( $\text{C}_3\text{S}$ );
- Silicato dicálcico, ou belita ( $\text{C}_2\text{S}$ );
- Aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ );
- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ).

A Tabela 2 apresenta a composição mineralógica do clínquer e seus respectivos valores médios para cimentos brasileiros:

*Tabela 2: Composição e proporções aproximadas dos componentes do cimento portland antes da hidratação. Adaptado de BARZELLAY (2015).*

<b>Componente</b>	<b>Proporção</b>
$\text{C}_3\text{S}$	50-65%
$\text{C}_2\text{S}$	15-25%
$\text{C}_3\text{A}$	6-10%
$\text{C}_4\text{AF}$	3-8%

Imediatamente após a adição de água começa o processo de hidratação do cimento. A hidratação do cimento é uma reação química exotérmica e consiste na

transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. Neste processo, cada composto hidrata-se de forma diferente, apresentando propriedades distintas. A soma dessas propriedades é que vão determinar as características finais do cimento Portland.

De acordo com GRANDE (2003), o conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como dos diversos fatores (calor liberado e velocidade de hidratação) que constituem essa reação, é de grande importância para o uso prático do cimento Portland. Por se tratar de um componente do solo cimento, é preciso compreender algumas características tecnológicas desse material.

As propriedades dos componentes principais do cimento em hidratação são as seguintes:

- $C_3S$ : propicia o desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e propicia alto desprendimento de calor, libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio (CH);
- $C_2S$ : proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas, com baixa liberação de calor, produz cerca de 18% de CH;
- $C_3A$ : reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação;
- $C_4AF$ : desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.

Segundo GRANDE (2003)

O processo de hidratação do cimento é bastante complexo e representado por várias reações químicas simultâneas e que interferem umas nas outras. É fato que o comportamento da hidratação (velocidade, distribuição e formação dos produtos hidratados) é função do tamanho dos grãos do cimento (superfície específica), temperatura, quantidade de água disponível e procedimentos de mistura.

Após a hidratação do cimento, três tipos básicos de cristais são formados:

- Etringita: forma-se no instante da hidratação e é responsável pelo controle do enrijecimento inicial da pasta de cimento;
- Portlandita: forma-se após algumas horas e possui pouca influência na resistência mecânica e durabilidade da pasta de cimento;
- Silicato de cálcio hidratado (S-C-H): forma-se após algumas horas. É o principal responsável pela resistência mecânica e durabilidade das pastas de cimento.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), no Brasil, são produzidos oito tipos de cimento Portland:

- CP I e CP I-S (NBR 5732/1991: Cimento Portland Comum);
- CP II (NBR 11578/1991: Cimento Portland Composto);
- CP III (com escória: NBR 5735/1991: Cimento Portland de alto forno);
- CP IV (com pozolana) (NBR 5736/1980: Cimento Portland Pozolânico);
- CP V ARI (Alta Resistência Inicial) (NBR 5733/1991: Cimento Portland com alta resistência inicial);

- CP – RS (Resistente a sulfatos) (NBR 5737/1992: Cimentos Portland resistentes a sulfatos);
- CPBC – Baixo calor de hidratação (NBR 13116/1994: Cimento Portland de baixo calor de hidratação);
- CPB – (NBR 12989/1994: Cimento Portland Branco).

Ressalta-se que a preocupação com o alto consumo energético durante o processo de fabricação do cimento, aliada aos avanços de pesquisas científicas que visam implementação de qualidades tecnológicas, motivou a introdução de escórias e materiais pozolânicos nas composições do cimento Portland. Hoje, a maior parcela do mercado é ocupada por cimento Portland composto.

### 2.3. PÓ DE BRITA

O pó de brita é um subproduto da britagem de rocha, passante na peneira de malha 6,3 mm. É um material muito comum na construção civil, principalmente em estabilização de solos em obras de terraplanagem e pavimentação. O mesmo pode ser visto na Figura 3.



*Figura 3: Pó de brita.*

De acordo com MENOSSI (Menossi, 2004), a utilização do pó de brita como agregado miúdo no concreto é de grande interesse na engenharia civil tanto por seu aspecto econômico quanto ambiental por se tratar de um material oriundo de rejeito, que originalmente trazia transtorno às pedreiras devido à estocagem e descarte, mas passou a ser um produto dotado de valor final mais acessível.

Novos equipamentos de britagem de rocha proporcionaram a evolução deste material no mercado, como por exemplo o impactador de eixo vertical tipo Barmac, que realiza o processo de fragmentação rocha contra rocha, gerando partículas equidimensionais. O equipamento pode ser visto na Figura 4:



Figura 4: Britadores de eixo vertical tipo Barmac. Fonte: METSO (2018)

## 2.4. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Segundo BRITO E SILVA (2017), a estabilização de solos é um processo realizado para estabilizar e suplementar as propriedades de resistência do solo, adequando-o para um determinado uso.

SENÇO (2007) menciona que, de uma forma geral, a estabilização de solos busca conferir ao produto final melhores características em relação ao solo natural, tais como estabilidade granulométrica, aumento da resistência mecânica, menor permeabilidade, maior durabilidade, entre outras. Ainda segundo SENÇO (2007), a estabilização de um solo pode ser conseguida simplesmente pela adequada distribuição das diversas porções de diâmetro dos grãos, chamada estabilização granulométrica. Em linhas gerais, a distribuição das porções de tamanhos diferentes é tal que os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos médios, cujos vazios são, por sua vez, preenchidos pelos grãos menores. O conjunto representa um produto de massa específica aparente superior à dos componentes, o que lhe dá maior resistência e impermeabilidade, além de exigir, em caso de uso de algum aglomerante (p. ex.: cimento, asfalto, cal etc.), o mínimo consumo desse.

“É preciso notar que o emprego do solo como material de construção deve ser realizado com critério, pois podem ocorrer problemas devido às propriedades desse material, que são muito complexas e heterogêneas” (GRANDE, 2003).

Ainda segundo GRANDE (2003), a estabilização promove:

- A redução do volume dos vazios, o que influencia sobre a porosidade;
- O preenchimento dos vazios que não podem ser eliminados por completo, alterando as características de permeabilidade do solo;
- A melhoria do entrosamento entre os grãos do solo, influenciando diretamente na resistência mecânica.

Pode-se classificar os métodos de estabilização de solos em três tipos:

- Estabilização mecânica;
- Estabilização física;
- Estabilização química.

A estabilização mecânica é a compactação do solo por meio de uma ação (aplicação de uma energia) mecânica. Como resultado, tem-se aumento da densidade e resistência mecânica, ao passo que se reduz a compressibilidade, a permeabilidade e a porosidade.

A estabilização física (mais conhecida como estabilização granulométrica) ocorre quando frações de diferentes granulometrias de solo são adicionados ao solo em questão, ou seja, mistura-se determinados tipos de solo para se obter um solo melhor graduado, proporcionando maior entrosamento dos grãos.

A estabilização química ocorre quando são adicionados ao solo materiais que reagem quimicamente com os grãos de solo e/ou a água existente (p. ex.: cal, asfalto, fibras vegetais e cimento).

Na construção civil todos os tipos de estabilização são frequentemente utilizados, por vezes mais de uma simultaneamente. O tipo de estabilização depende da viabilidade econômica, finalidade da obra e das características do solo.

O fato das características mineralógicas e do tamanho das partículas terem expressiva influência no comportamento do solo, principalmente na fração fina como é o caso de siltes e argilas, faz com que o mesmo não possa ser classificado como um material quimicamente inerte.

#### **2.4.1. SOLO-CIMENTO**

De acordo com BALBO (Balbo, 2015), solo-cimento é o material resultante da mistura de solo com um dado teor de cimento que resulta, após a compactação e hidratação do ligante hidráulico, em mistura com expressiva rigidez.

O efeito do cimento na mistura, diferentemente do caso dos agregados, é criar envoltórias nos grãos de solo (menores que os cristais hidratados do cimento), criando uma barreira contra água e evitando, em decorrência disso, a expansão de solos sensíveis a umidade.

Não há um consenso quanto ao início da utilização de solo-cimento na construção civil. De acordo com LIMA, apud NASCIMENTO (Nascimento *et al.*, 2018), pesquisas com a utilização de solo-cimento com material de construção começaram a ganhar destaque nacional após a regulamentação de seu processo de fabricação pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) na década de 1930.

Historicamente, de acordo com SENÇO (2007), a ideia de utilizar a mistura de solo-cimento como material de construção só começou no final da década de 1940, como base e sub-base de rodovias. Surgiu da busca por materiais mais econômicos e disponíveis nas proximidades do canteiro de obras.

A partir de então, o solo-cimento tem sido empregado principalmente na pavimentação como camadas de base e sub-base para pavimentos rígidos e flexíveis de estradas e aeroportos, valetas de drenagem, revestimentos de canais, diques, reservatórios e barragens de terra; estabilização e proteção superficial de taludes;

fundações de edifícios, muros de arrimo e, finalmente, em alvenarias de tijolos e blocos prensados ou painéis de paredes monolíticas para construção de moradias.

Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, devendo ser selecionado de modo que permita o menor consumo possível de cimento. Segundo Pinto (1980) o solo ideal deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, sendo que os solos arenosos bem graduados e com razoável quantidade de silte mais argila, são os mais indicados, de vez que exigem baixo consumo de cimento; já a Portland Cement Association (PCA, 1969) considera excelentes os solos arenosos e pedregulhosos, contendo de 65 a 90% de areia e quantidade de silte mais argila variando de 10 a 35%." (Souza *et al.*, 2008).

De acordo com GRANDE (2003), a natureza do cimento deve ser considerada para a proposta de desenvolvimento de pesquisas que visam melhorar o desempenho do solo-cimento, assim como em concretos e argamassas.

A compreensão desses fenômenos microscópicos é de fundamental importância para se conduzir pesquisas envolvendo adições complementares à tecnologia do solo-cimento, como por exemplo, o uso de agregado originados de entulhos e material reciclado, tipos de cimentos, outros materiais pozolânicos (entre eles a sílica ativa, escórias de alto forno, cinzas volantes) e aditivos químicos (GRANDE, 2003, p. 33).

A característica aglomerante e pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar já foi estudada na fabricação de tijolos de solo-cimento por VALENCIANO E FREIRE (Valenciano e Freire, 2004), os quais notaram aumento da resistência à compressão simples com a incorporação de 3% de cimento ou sua substituição parcial por 20% de cinzas de bagaço do cana-de-açúcar. Referências também mostram acréscimo da resistência à flexão com o aumento do teor de cinzas da mistura, tanto para cinzas de bagaço de cana-de-açúcar quanto para cinzas de casca de arroz.

#### **2.4.2. FATORES QUE CONDICIONAM A QUALIDADE DA MISTURA DE SOLO-CIMENTO**

Os fatores que mais influenciam nas características finais da mistura de solo-cimento são:

- O tipo de solo;
- O teor de cimento;
- Método de mistura;
- Compactação;
- Processo de cura.

De todos, o tipo de solo é o mais influente e, se o mesmo for inadequado, pouco se poderá fazer para se obter um produto satisfatório, de acordo com GRANDE (2003). Recomenda-se que, para tanto, a fração fina (silte mais argila) do solo não ultrapasse 50% da massa total.

Em tese, quanto maior o teor de cimento, maiores serão a resistência à compressão e durabilidade da mistura. No entanto, deve ser observado que teores demasiadamente elevados podem ocasionar fissuração durante o processo de cura.

O procedimento de mistura de solo-cimento deve seguir a ordem:

- preparação do solo (destorroamento e peneiramento);
- preparação da mistura (adição de cimento, homogeneização seca, adição de água e homogeneização da umidade);
- moldagem.

Cabe ressaltar que a mistura deve ser protegida da luz solar enquanto não chegar ao seu destino final.

É essencial que haja uma compactação adequada da mistura. Para tanto, é importante ter o conhecimento da influência do teor de umidade de compactação na mistura, uma vez que somente uma boa compactação pode garantir que o material atinja um determinado peso específico ou densidade aparente, que lhe confira resistência mecânica apropriada.

Uma redução de apenas 5% na massa específica seca do solo-cimento, proporciona decréscimos da ordem de 15% na resistência mecânica para o mesmo teor de cimento, porém, solos arenosos alcançam maiores resistências quando a umidade da mistura está pouco abaixo da umidade ótima, contudo, a durabilidade do material é afetada. De maneira análoga, STANTON et al. Apud BLÜCHER (1951) relata que uma diminuição de 5% da massa do material compactada provoca um decréscimo superior equivalente ao decréscimo causado pela redução de 10% a 15% no teor de cimento (GRANDE, 2003, p. 30).

Em analogia à tecnologia dos concretos, convém afirmar que a cura é de fundamental importância para a qualidade do solo-cimento. É recomendável que a cura do solo-cimento seja realizada em ambiente protegido da luz direta do sol, se possível com umidade controlada.

### **2.4.3. MÉTODOS DE DOSAGEM DA MISTURA DE SOLO-CIMENTO**

De acordo com SENÇO (2007), o primeiro requisito para se obter uma boa mistura de solo-cimento é a utilização de um teor conveniente de cimento Portland misturado com o solo destorroado e peneirado. Outro requisito é que a mistura seja feita com o teor ótimo de umidade, produzindo uma mistura que, antes da hidratação do cimento, possa ser devidamente compactada, atingindo a massa específica máxima.

Dessa forma, verifica-se que a dosagem da mistura de solo-cimento-água deverá, a partir da escolha do solo, determinar os teores ótimos dos outros dois materiais – cimento e água – fornecendo ao construtor os dados necessários para o cálculo das quantidades e as especificações.

Em um exame genérico, pode-se dizer que solos de boa qualidade podem adquirir resistência elevada, com baixos teores de cimento. A dosagem e a execução

também podem ser controladas com razoável eficiência. O Método Simplificado é uma dosagem recomendada para solos arenosos. Nesse método são utilizadas tabelas e ábacos resultantes da experiência adquirida com solos arenosos, eliminando-se alguns ensaios e reduzindo-se o trabalho e o tempo de pesquisa.

Admitindo de início a utilização de solos arenosos, os mesmos devem satisfazer os seguintes requisitos:

- Ter no máximo 50% de silte mais argila;
- Ter menos de 20% de argila;
- Não ter porcentagens significativas de impurezas e matéria orgânica.

Limites quanto aos índices físicos:

- $LL < 40\%$ ;
- $IP < 18\%$

Além do Método simplificado há também outros métodos como por exemplo o Método Geral e o método Físico-Químico. O Método Geral é aplicável a qualquer tipo de solo (exceto os orgânicos) e seu critério de dosagem é baseado na perda de massa de corpos de prova submetidos a 12 ciclos de ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Já o Método Físico-Químico é baseado na interação elétrica entre as partículas de cimento e de argila contidas no solo.

É importante ressaltar que o método de dosagem, por mais rigoroso que seja, não implicará necessariamente na obtenção de uma mistura de boa qualidade, uma vez que para isso devem ser observados outros fatores intervenientes, como: teor de umidade da mistura, operações de mistura e de compactação, tempo e condições de cura.

## **2.5. O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO**

De acordo com (Lima, 2010)), por ser um material abundante e de fácil obtenção na natureza, desde os primórdios da humanidade o solo vem sendo utilizado para construir abrigos eficientes contra as hostilidades do meio ambiente, sobretudo em locais onde o manuseio de rochas e madeira é difícil.

Segundo ANGST (Angst, 2013), tijolos de barro seco ao sol já eram utilizados na Mesopotâmia no período de 4000 a. C. a 300 a. C. Maleáveis, porém pouco resistentes, foram mais tarde trocados por tijolos cozidos. A ideia de construir com tijolos chegou ao Egito por volta de 3100 a. C. Muitos faraós construíram suas pirâmides em pedra, mas seus palácios eram de tijolos.

Na Grécia Antiga (600 a.C. a 400 a.C.) predominou-se o uso de blocos de pedra, talhados com muita precisão, encaixados sem argamassa. Mas foi em Roma, no século II a.C., onde todos os materiais de construção tradicionais (pedra, madeira, barro e metais) já eram conhecidos e utilizados. Vide o Coliseu romano, no qual foram utilizados em sua estrutura materiais como madeira, mármore, tijolos de pedra, entre outros.

Ainda segundo LIMA (2010), o uso de solos em edificações foi visto desde grandes construções, como a muralha da China, com aproximadamente três mil quilômetros de extensão até habitações simples, como a Taos Pueblo no Novo México, apontada pela UNESCO como uma das favelas mais antigas do mundo e patrimônio mundial.

Outra aplicação do solo como material de construção muito popular até hoje, é a taipa. PIRES (2004) aponta que, no Brasil, cidades como Ouro Preto, Diamantina e Paraty têm em comum cerca de 400 anos de uso intensivo das técnicas de taipa-de-pilão, do adobe, e pau-a-pique. Os métodos de construção utilizando solo foram intensamente empregados até 1845, quando surgiu um novo material, o cimento Portland. A partir de meados do século XIX, o solo começou a ser visto como material de segunda categoria e passou a ser utilizado, quase que exclusivamente, nas áreas rurais. A Figura 5 mostra um exemplo de construção em taipa.



*Figura 5: Construção em Taipa. Fonte: NYGAARD (2011)*

A Figura 6 apresenta uma obra sendo construída com adobe.



*Figura 6: Construção em adobe. Fonte: ANDRADE, OLIVEIRA, EGYPTO (2012)*

Segundo GRANDE (2003), desde a década de 1970, diversos órgãos de pesquisa, arquitetos e engenheiros defendem a causa do uso do solo como material de construção de habitações. Esse fator foi impulsionado quando começaram a ser discutidas as questões relativas ao impacto ambiental causado pela indústria da construção civil, somado ao fato de representar um baixo custo e uma alternativa viável à populações carentes, completa LIMA (2010).

## **2.6. TIJOLO DE SOLO-CIMENTO**

As características dos tijolos de solo-cimento são resultado do entrosamento dos grãos do solo compactado. Estes possuem baixa porosidade e alta densidade, diferentemente dos tijolos cerâmicos. O entrosamento dos grãos está diretamente ligado à energia de compactação presente no momento de prensagem dos tijolos. Daí a importância do equipamento utilizado na moldagem dos mesmos.

A presença do equipamento de prensagem também permite garantir a uniformidade dimensional do produto. A uniformidade dos tijolos de solo-cimento contribui para a redução do consumo de argamassa de assentamento, quando não a eliminação completa da mesma, pois o formato dos tijolos, além de proporcionar um acabamento diferenciado, ainda permite encaixes entre os mesmos.

Uma das vantagens dos tijolos de solo-cimento é que eles podem ser utilizados como alvenaria estrutural, além de apresentarem bom comportamento térmico e boa durabilidade.

Outra vantagem presente no tijolo de solo-cimento é a possibilidade de adição de materiais como resíduos de marmoraria, rejeitos industriais (cinzas volantes, escória de alto-forno), subprodutos de beneficiamento de produtos agrícolas (cinzas de bagaço de cana, casca de arroz etc.), de RCC (Resíduo de Construção Civil), entre

outros. Além dessa, pela ausência de queima no processo de fabricação, há menos consumo de energia e, por consequência, menos danos ambientais.

Projetos sociais baseados na construção de moradias para população de baixa renda têm sido realizados explorando a alvenaria de tijolos de solo-cimento como método construtivo. Tais projetos contam com a mão de obra em regime de mutirão, ou seja, a própria população contemplada com o programa constrói suas casas, cabendo à equipe de projeto supervisionar e promover a capacitação técnica dos mesmos. Dentre eles cabe ressaltar o projeto “SHS - Solução Habitacional Simples: Reconstruindo Após Desastres e Conflitos”, promovido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. O projeto foi dirigido pelo professor Leandro Torres Di Gregorio e contou com a participação de aproximadamente 90 voluntários, formando uma equipe multidisciplinar de professores e alunos de diversos cursos da instituição. O objetivo do projeto é de gerar e disponibilizar gratuitamente um material didático que serve como suporte para reconstrução de áreas que passaram por situações de desastres e conflitos. Mais informações sobre o projeto podem ser adquiridas através do site [www.shs.poli.ufrj.br](http://www.shs.poli.ufrj.br).

Apesar do custo de uma unidade de tijolo de solo-cimento é, em geral, maior do que a unidade de um tijolo cerâmico, o custo total de uma moradia popular com cerca de 40 m<sup>2</sup> realizada com processo de mutirão chega a ser 34% mais econômica do que com alvenaria convencional, como apontado por PIRES (Pires, 2004). Esse método ainda reduz drasticamente o tempo de execução da obra, segundo GRANDE (2003) e PENTEADO E MARINHO (Penteado e Marinho, 2011).

O processo de fabricação do tijolo de solo-cimento prensado compreende, resumidamente, às seguintes etapas:

- Seleção de uma jazida adequada;
- Preparação do solo: consiste em destorroar e peneirar o solo seco;
- Preparo da mistura: adição de cimento ao solo preparado e realiza-se uma mistura com os materiais secos. Após a homogeneização adiciona-se água e mistura-se novamente o material até uniformizar a umidade no solo;
- Moldagem dos tijolos;
- Cura e armazenamento: após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens.

A ABCP (1988) recomenda que quantidade da mistura deve ser dimensionada para a produção de tijolos durante 1 hora de funcionamento da prensa. Este fato deve-se a questão da perda de umidade da mistura para o ambiente.

*Segundo a NBR 10833/2012: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento, os solos adequados para a fabricação de componentes de alvenaria são os que possuem as seguintes características apresentadas na*

Tabela 3:

Tabela 3: Critérios para a seleção de solos de acordo com a NBR 10833/2012

<b>Característica</b>	<b>Requisitos (%)</b>
Percentual passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4)	100
Percentual passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Índice de plasticidade	≤ 18

Em termos de dosagem, ABCP (1988) recomenda moldar tijolos com proporções, em volume, de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14. A escolha do traço adequado deve ser a que apresentar menor consumo de cimento e atender aos critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecidos na NBR 8491/2012: Tijolo de solo-cimento – Requisitos, dispostos na Tabela 4:

Tabela 4: Critérios estabelecidos para tijolos de solo-cimento na NBR 8491/2012

<b>CRITÉRIO</b>	<b>VALOR MÉDIO</b>	<b>VALORES INDIVIDUAIS</b>
Resistência à compressão	≥2,0 MPa	≥1,7 MPa
Absorção de água	≤20%	≤22%

### 3. CAMPANHA DE ENSAIOS

Neste tópico, além da descrição dos ensaios realizados, são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e que constituem os tijolos de solo-cimento (solo, cimento, cal e pó de brita).

Parte dos ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da UFRJ/Macaé e outros no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis da Escola Politécnica/COPPE (NUMATS) no Centro de Tecnologia da UFRJ na Ilha do Fundão.

#### 3.1. SOLO

O solo utilizado como matéria-prima para a fabricação dos tijolos foi proveniente da própria universidade, situada na Av. Aloísio da Silva Gomes, 50 - Novo Cavaleiros, Macaé - RJ, nas proximidades do laboratório de Engenharia Civil. Sua localização está apontada na Figura 7:



Figura 7: Localização das jazidas de solo. Fonte: Google maps (acesso em 11 de junho de 2018)

A coleta de solo foi manual, como pode ser visto na Figura 8:



Figura 8: Coleta de solo

A Figura 9 apresenta os dois tipos de solo extraídos.



*Figura 9: Solo 1 e solo 2, respectivamente.*

Inicialmente foram selecionadas duas jazidas diferentes de solos. Em uma primeira análise táctil-visual constatou-se que ambos os solos poderiam ser solos tropicais lateríticos, um aparentemente com mais finos que o outro.

Cabe ressaltar que estes solos, geralmente, apresentam um bom comportamento quando compactados, ou seja, exibem um ganho de resistência, sendo, muitas vezes, utilizados em obras de pavimentação.

As amostras de solo submetidas aos ensaios de caracterização foram preparadas segundo a NBR 6457/2016: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

### **3.2. OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS**

No decorrer da pesquisa, foram utilizados dois tipos de cimento Portland, a saber, o CP III 32 e CP IV – ARI. A escolha do tipo de cimento foi determinada pela disponibilidade no laboratório.

O pó de brita utilizado neste trabalho foi cedido pela Jundiá Mineração.

Também foi utilizada cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) na fabricação dos tijolos. A escolha da marca foi determinada pela disponibilidade no laboratório.

### **3.3. ENSAIOS PRÉ-FABRICAÇÃO**

#### **3.3.1. GRANULOMETRIA**

O ensaio de granulometria é o procedimento utilizado para determinar a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. O método mais direto para separar uma porção

de solo em suas frações é através do ensaio de peneiramento, no qual são utilizadas peneiras com tamanho de aberturas de malha bem definidas.

Quanto à fração fina do solo, devido não somente ao tamanho, mas também à forma e composição dos grãos, os mesmos encontram-se sob efeitos de forças intermoleculares que dificultam sua separação e classificação. Esta pode ser analisada através do ensaio de sedimentação, no qual a amostra é dispersa em água com a adição de defloculante e, com o tempo, as partículas maiores sedimentam e se depositam no fundo, permitindo assim, a análise da amostra.

Os resultados obtidos nesse ensaio tornam possível a construção da curva de distribuição granulométrica do solo ensaiado, tão importante para a classificação do mesmo. A norma técnica utilizada para este ensaio foi a NBR 7181/2016: Solo – Análise granulométrica.

A aparelhagem utilizada para a execução do ensaio foi:

1. Balança com resolução de 0,1% da massa da amostra de ensaio;
2. Estufa para secagem.
3. Peneiras das séries normal e intermediária, tampa e fundo;
4. Agitador mecânico de peneiras;
5. Bandejas;
6. Escova ou pincel de cerdas macias;
7. Aparelho de dispersão com hélices e copo munido de chicanas;
8. Proveta de vidro com capacidade de 1000 cm<sup>3</sup>;
9. Densímetro de bulbo simétrico;
10. Termômetro graduado em 0,1 °C;
11. Relógio com indicação de segundos;
12. Béquer de vidro com capacidade de 250 cm<sup>3</sup>;
13. Defloculante (Hexametáfosfato de sódio)

A Figura 10 apresenta as peneiras e a balança utilizadas no ensaio de granulometria na fase de peneiramento:



*Figura 10: Jogo de peneiras e balança utilizadas no ensaio de peneiramento*

A Figura 11 apresenta os equipamentos utilizados no ensaio de granulometria na fase de sedimentação:



Figura 11: Aparelhagem utilizada no ensaio de sedimentação

As amostras foram secas em estufa (105-110) °C, esfriadas até a temperatura ambiente destorroadas e passadas na peneira #10 (2,0 mm). O solo passante será utilizado no ensaio de peneiramento e 70 g de material será separado para ser utilizado no ensaio de sedimentação.

O solo retido na peneira #10 foi pesado e transferido para a peneira de 0,075 mm em um tanque com água corrente. Após a transferência, lavou-se com água a mistura, de modo que o solo com granulometria inferior a 0,075mm passe pela peneira e seja, naturalmente, descartado. O solo foi então transferido para uma bandeja e seco em estufa por, pelo menos, 24h, logo após destorroado e pesado.

O solo foi então transferido para o conjunto de peneiras na ordem (de cima para baixo): 1,20 mm, 0,60 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm e fundo. O conjunto foi agitado no agitador mecânico por cerca de 15 minutos e, em seguida, pesou-se o solo retido em cada peneira.

Dos 70 g de amostra de solo passante na peneira #10 separada anteriormente foi adicionado defloculante (125 cm<sup>3</sup> de solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1000 cm<sup>3</sup> de solução). Cabe ressaltar que nesta pesquisa o ensaio de sedimentação foi realizado de duas formas. A primeira delas, de acordo com a NBR 7181/2016, ou seja, usando o defloculante hexametáfosfato de sódio e na segunda forma o ensaio foi realizado usando água com sal na proporção de duas colheres de chá para 120 ml de água<sup>1</sup>. Apesar da norma recomendar apenas a utilização de defloculante, é de interesse desse trabalho buscar alternativas mais econômicas para a execução dos ensaios e analisar a eficiência dos mesmos. Em seguida o béquer foi agitado até que todo o material ficou imerso, deixando-o em repouso por 12 horas.

<sup>1</sup> Comunicação pessoal do prof<sup>o</sup> Leandro Torres com o prof<sup>o</sup> Fernando Teixeira, em 2012

Passado o intervalo de tempo, a mistura foi colocada no copo de dispersão, removendo-se com água destilada o material aderido ao béquer. O aparelho dispersor foi então acionado e deixado por 10 min.

Em seguida a amostra, já dispersa, foi transferida para a proveta, como mostra a Figura 12.



Figura 12: Ensaio de sedimentação: Execução

O material aderido ao copo do aparelho foi retirado com água destilada. Na proveta, além da mistura, foi adicionada água destilada para que fosse alcançada a marca de 1000 cm<sup>3</sup>. Com o aparelho de dispersão de hélices agitou-se a proveta para promover a mistura dos componentes.

Imediatamente após a agitação, a proveta foi colocada sobre a bancada, o densímetro foi mergulhado na solução e o tempo de sedimentação começou a ser contado. As leituras foram tomadas nos tempos 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30 min e 1; 2; 4; 8 e 24 horas.

Com os dados obtidos calcula-se as porcentagens correspondentes a cada leitura do densímetro referentes a massa total da amostra através da fórmula:

$$Q_s = N \cdot \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \cdot \frac{V \cdot (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100 + h)} \cdot 100} \quad (1)$$

Em que:

- $Q_s$  = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

- $N$  = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm;
- $\delta$  = massa específica dos grãos de solo, em g/cm<sup>3</sup>;
- $\delta_d$  = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm<sup>3</sup>;
- $V$  = volume da suspensão, em cm<sup>3</sup>;
- $\delta_c$  = massa específica da água, à temperatura de calibração do densímetro, em g/cm<sup>3</sup>;
- $L$  = leitura do densímetro na suspensão;
- $L_d$  = leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da dispersão;
- $M_h$  = massa do material úmido submetido à sedimentação, em g;
- $h$  = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm.

Com posse dos valores de massa da amostra completa e das porções retidas em cada peneira e com os dados obtidos da sedimentação, é possível gerar a curva granulométrica de cada amostra de solo.

### 3.3.2. LIMITES DE ATTERBERG

Os limites de Atterberg (ou limites de consistência) são assim chamados os limites de liquidez e de plasticidade do solo.

O Limite de Liquidez (LL) é caracterizado pela quantidade de água que, adicionada ao solo é capaz de causar perda de coesão de suas partículas; O Limite de Plasticidade (LP) é caracterizado pelo momento em que, se retirada gradativamente a umidade do solo, este passa do Estado plástico moldável para o estado semissólido não moldável; finalmente, Índice de Plasticidade (IP) é o intervalo de umidade que torna o solo plástico obtido pela diferença entre LL e LP.

Para aferir o Limite de Liquidez (LL) de uma amostra de solo mede-se o teor de umidade com que se unem, em 1 cm de comprimento, as bordas inferiores de uma fenda feita em uma massa de solo colocada na concha de um aparelho normalizado (Aparelho de Casagrande) sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base desse aparelho. As diretrizes para a realização desse ensaio são regulamentadas pela NBR 6459/1984 Solo: Determinação do limite de liquidez.

A aparelhagem requerida para este ensaio, de acordo com a NBR 6459/1984 é:

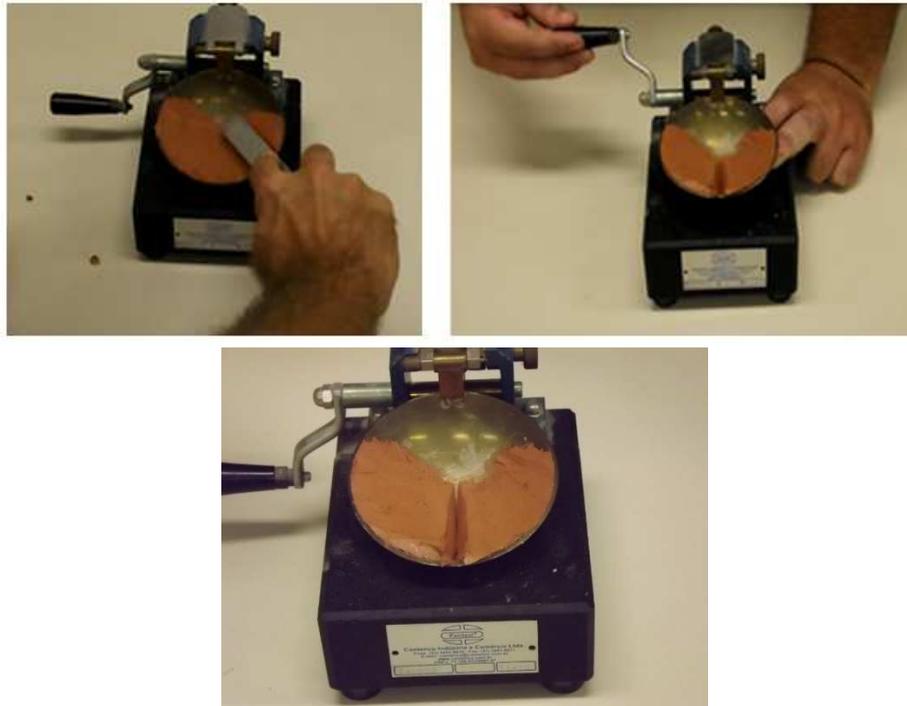
- Peneira de 0,425 mm (Nº 40);
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C;
- Balança com capacidade de 200 g, sensível a 0,01 g;
- Aparelho de Casagrande;
- Cinzel do aparelho de Casagrande;
- Cápsula de porcelana com 12 cm de diâmetro;
- Funil de 5 cm diâmetro;
- Espátula de aço.

A Figura 13 apresenta cápsula de porcelana, espátula de aço, aparelho de casa grande e cinzel, peneira #40 e garrafa plástica com água destilada utilizados no ensaio respectivamente.



Figura 13: os equipamentos utilizados para a realização do limite de liquidez.

Da fração do solo passante na peneira 40 (0,425 mm), colocou-se cerca de 100 g de material na cápsula de porcelana e acrescentou-se água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo com o auxílio da espátula até ser obtida uma massa homogênea. Essa massa foi então transferida para a concha do aparelho de Casagrande, onde é moldada de tal forma a se obter uma camada de solo com cerca de 1 centímetro de espessura na região central da concha e, com o cinzel metálico, é feita uma ranhura no centro da amostra. O aparelho foi então acionado girando-se a manivela fazendo com que a concha, juntamente com a amostra é golpeada contra a base do aparelho e registra-se o número de golpes tal qual as bordas inferiores da ranhura se unam em cerca de 1,3 cm de comprimento, como mostrado na Figura 14.



*Figura 14: Moldagem da amostra no aparelho de Casagrande, aplicação dos golpes e ranhura na amostra de solo*

Em seguida retira-se parte da amostra da região em que ela se uniu para a determinação da umidade na estufa e o procedimento foi então repetido por mais quatro vezes. Os valores foram dispostos em um gráfico nº de golpes x umidade e, através de uma curva de tendência, estimou-se a umidade correspondente a 25 golpes do aparelho.

O Limite de Plasticidade (LP) é o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se o solo com a palma da mão. A NBR 7180/1984: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade determina o procedimento para a realização deste ensaio.

A aparelhagem necessária para a realização deste ensaio, de acordo com a NBR 7180/1984, e utilizada no mesmo foi:

- Peneira de 0,425 mm (Nº 40);
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C;
- Balança com capacidade de 200 g, sensível a 0,01 g;
- Placa de vidro esmerilhado;
- Cápsula de porcelana com 12 cm de diâmetro;
- Cilindro de comparação (gabarito);
- Espátula de aço;
- Pinça metálica.

A Figura 15 apresenta a placa de vidro esmerilhada e o gabarito metálico utilizados no ensaio.



Figura 15: Placa de vidro esmerilhado e gabarito metálico

Para a realização do ensaio tomou-se cerca de 100 g da amostra retida na peneira 40 (0,425 mm), colocou-a na cápsula de porcelana e acrescentou-se água destilada. Retira-se parte da massa obtida para formar uma pequena bola que, ao ser rolada sobre a placa de vidro esmerilhado forma um cilindro de 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento.

Amassou-se então o material, tomando-se como base o gabarito metálico. Tendo sido feito o cilindro coletou-se o material para determinação de umidade na estufa. Repetiu-se o procedimento por mais duas vezes. Ressalta-se que nas vezes em que o cilindro fissurou antes de atingir as dimensões requeridas, misturou-se novamente a amostra adicionando água destilada em pequena quantidade e repetiu-se o procedimento. Ao final foi tomada a média dos três resultados.

A Figura 16 mostra a execução do ensaio.

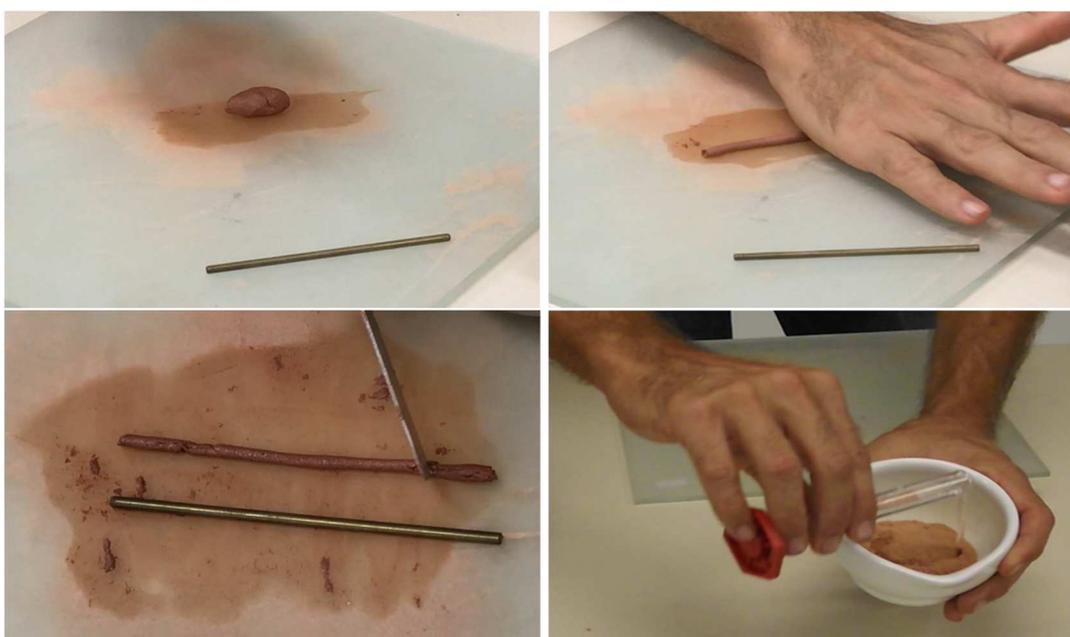


Figura 16: Limite de plasticidade: Execução do ensaio

### 3.3.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

A densidade real de uma amostra de solo é a relação entre a massa específica das partículas sólidas e a massa específica de igual volume de água pura a 4 °C e a norma referente a este ensaio, proveniente do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, é a ME 093/94 “Densidade real dos solos” do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente denominado Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

Os aparelhos utilizados para a realização do ensaio foram:

- Peneira 2mm;
- Picnômetro de vidro;
- Termômetro;
- Fogareiro elétrico ou bomba de vácuo;
- Água destilada;
- Bacia plástica;
- Balança 200g.

A Figura 17 apresenta o picnômetro de 500 ml, peneira #10 (2,0 mm), fogareiro elétrico, termômetro, dosador com água destilada e balança com capacidade de 311 g utilizados no ensaio, respectivamente.



Figura 17: Alguns dos equipamentos utilizados no ensaio.

A amostra foi seca em estufa a (105 – 110) °C até atingir peso constante. Após o esfriamento da mesma, retirou-se cerca de 10 g da amostra para prosseguimento ao ensaio. Cabe ressaltar que a massa da amostra a ser utilizada nesse ensaio

depende do volume do picnômetro. Na prática adota-se, no mínimo, cerca de 10% em massa do volume do picnômetro (p. ex.: picnômetro de 100 ml, utiliza-se 10g de solo).

Primeiramente pesou-se o picnômetro vazio, seco e limpo. Em seguida colocou-se a amostra de solo no picnômetro e pesou o conjunto. Logo depois adicionou-se água destilada no picnômetro até cobrir a massa de solo e deixou-se ferver por cerca de 15 minutos para que todo o ar fosse expulso da amostra, sempre agitando o recipiente para evitar o superaquecimento.

Tendo decorrido o tempo deixou-se o picnômetro, juntamente com a amostra de solo, esfriar até a temperatura ambiente, completou-se o conjunto com água e colocou-se a tampa. O conjunto foi cuidadosamente seco e posteriormente pesado. Após obtido o peso do picnômetro, água e solo o conjunto foi esvaziado, limpo e seco.

O próximo passo foi completar o picnômetro com água destilada. Os mesmos cuidados mencionados anteriormente (p. ex.: colocação da tampa, equilíbrio de temperatura e secagem do conjunto) foram tomados.

O procedimento do ensaio pode ser visualizado na Figura 18.



Figura 18: Determinação da densidade real dos grãos: Execução do ensaio

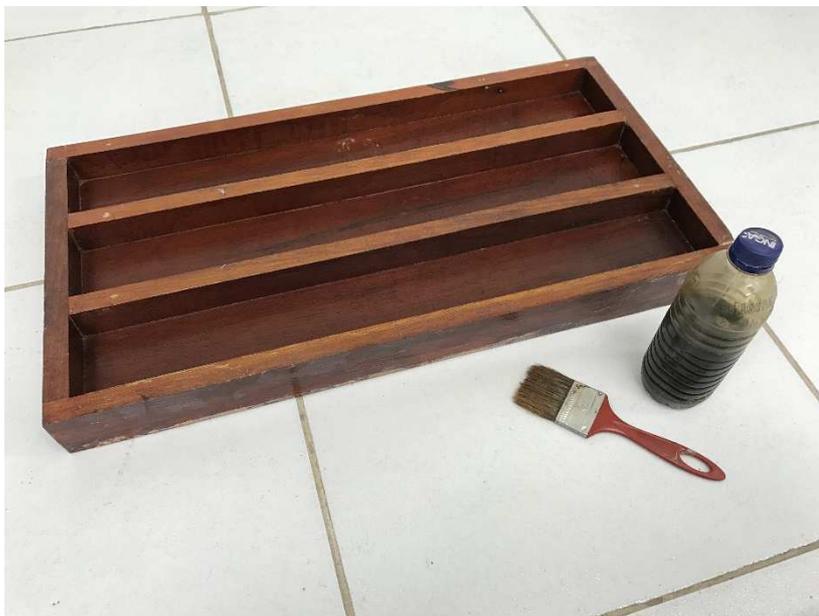
#### 3.3.4. RETRAÇÃO

Foi realizado também um teste adaptado para verificar a retração do solo durante o processo de secagem ao ar. Vale destacar que não existe uma norma técnica que descreva esse ensaio.

A retração do solo é a redução de volume que se dá em uma porção do mesmo devido à perda de umidade. Essa redução pode ocasionar trincas no corpo da amostra.

O teste da canaleta consiste em tomar uma porção de solo destorroado e peneirado (peneira de abertura de malha de 4,8 mm). Em um balde, misturar água aos poucos ao solo até que a mistura comece a grudar na colher de pedreiro (consistência de argamassa).

A Figura 19 apresenta alguns dos equipamentos utilizados para a execução do ensaio.



*Figura 19: Caixa de madeira, óleo e pincel utilizado na lubrificação*

O solo é umedecido e colocado em uma caixa de madeira, com dimensões internas de (60 x 8,5 x 3,5) cm, previamente lubrificada com óleo (p. ex.: óleo de cozinha).

A altura do lançamento do solo na caixa foi de cerca de 30 cm. Após aplainamento da mistura na caixa o conjunto foi guardado ao abrigo do sol e da chuva, durante 7 dias. O resultado é aferido após esse período analisando a retração nos dois sentidos da caixa e o aparecimento, ou não, de trincas.

A Figura 20 apresenta as etapas do procedimento:



Figura 20: Execução do ensaio de retração.

### 3.4. FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Para a produção de tijolos foi utilizada uma prensa manual com moldes de dimensões 12,5 cm x 25 cm x 6,5 cm (largura x comprimento x espessura) e encaixes que permitem a amarração direta entre os componentes na execução da alvenaria.

A produção de tijolos de solo-cimento iniciou-se em maio de 2017 no NUMATS e em dezembro de 2017 no laboratório de Engenharia Civil em Macaé/RJ. A Figura 21 apresenta a prensa manual e o destorroador mecânico de solo utilizados.



Figura 21: Prensa manual e destorroador mecânico de solo (Fonte: VIMAQ PRENSAS)

A seguir seguem informações importantes do fabricante da prensa.

#### **Prensa:**

- **Tipo:** modular 12,5 x 25;  
Produz tijolos de encaixes universais de solo-cimento vazados, com 12,5 cm de largura, 25 cm de comprimento, 6,5 cm de espessura e furos internos de 6,8 cm de diâmetro, indicados para edificações de alvenaria em geral.
- **Massa:** aproximadamente 80 kg;
- **Capacidade de Produção:** 250 a 300 tijolos por hora;
- **Peças por m<sup>2</sup> de parede:** 100 tijolos somente encaixados;
- **Acessórios:** dispositivo para a produção de ½ tijolo, indicado para acabamentos de portas e janelas; canaleta, para a execução de vergas e cintas de amarração.
- **Tensão de Compactação:** 2,0 MPa a 3,0 MPa, segundo o fabricante;

#### **Destorroador mecânico:**

- **Tipo:** Máquina destinada a destorroar a mistura de solo-cimento, proporcionando uma melhor homogeneização da umidade;
- **Massa:** aproximadamente 100 kg;
- **Dispositivo:** motor de 2 HP e lâmina de trituração.

A utilização deste tipo de prensa dialoga com um dos objetivos do presente trabalho, pois pode proporcionar, por meio de técnicas simples e soluções viáveis, o desenvolvimento de materiais e sistemas de construção sustentáveis com componentes fabricados no local da obra. É, portanto, uma grande ferramenta na realização de programas habitacionais de autogestão e autoconstrução.

Além da prensa e triturador também foram utilizados pá e enxada para a coleta de solo e mistura dos componentes, baldes graduados para transporte e medição de material, masseira na qual se misturava os materiais e caixa d'água com capacidade de 1000 litros para a cura dos tijolos.

O processo de fabricação dos tijolos é constituído, basicamente, por cinco passos: armazenamento dos componentes, preparação da mistura, moldagem dos tijolos na prensa, cura dos tijolos produzidos e ensaios de absorção de água e resistência a compressão

#### a) Armazenamento dos componentes:

Foram necessários cuidados especiais no armazenamento dos três componentes para a fabricação dos tijolos solo-cimento (solo, cimento e cal hidratada). Todos os materiais foram armazenados em local coberto. O solo, quando não coletado imediatamente antes do processo de produção, foi colocado dentro de sacos plásticos, protegido da variação de umidade, da chuva e do contato com outros materiais/resíduos (outros solos, serragem, óleo, etc.).

#### b) Preparação da mistura:

Misturou-se manualmente os solos, cimento e cal hidratada na masseira em suas devidas proporções, homogeneizando bem a mistura com o auxílio de pá e enxada. A medição era aferida por volume em baldes com marcação, mostrados na Figura 22.



Figura 22: Cimento, cal e solo utilizados na mistura. Na ocasião, 9,2, 1,2 e 54 litros, respectivamente.

Pedregulhos foram coletados manualmente e retirados da mistura, contabilizando-se a diferença. Logo após foi realizada uma correção de umidade até que o ponto ideal fosse encontrado. A mistura de solo, cimento, cal hidratada e água foi, então, novamente revolvida para logo após ser submetida ao destorroador mecânico mecânico, sendo que o tempo máximo para utilização após a adição de água é de uma hora. A Figura 23 mostra o processo de mistura dos componentes.



Figura 23: Mistura dos componentes solo, cimento, cal e água e destorroamento da mistura

Cabe ressaltar que esses procedimentos de preparação da mistura devem ser realizados em local apropriado, ou seja, sem que haja incidência da luz do sol ou chuva.

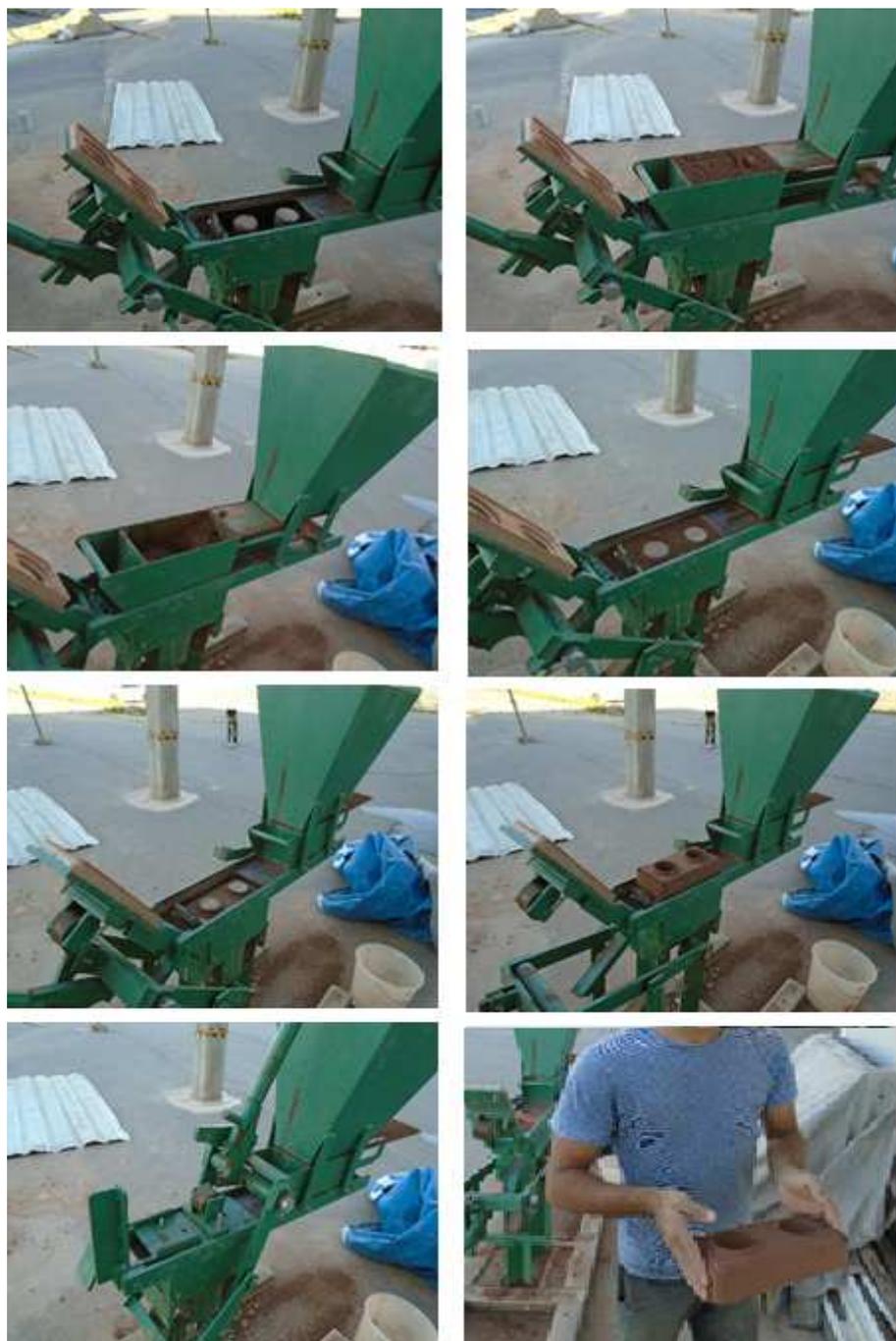
Nos tijolos fabricados no NUMATS esse controle foi rigoroso, como destaca LIMA (2018). Já nos tijolos fabricados no Laboratório de Engenharia Civil de Macaé não foi possível ter um controle tão rígido.

Para os tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita, o único diferencial é o pó de brita ser adicionado juntamente com o solo, cimento e cal. O restante do procedimento é igual aos adotados na fabricação dos tijolos de solo-cimento convencionais.

c) Moldagem dos tijolos na prensa:

A moldagem dos tijolos foi feita em uma prensa manual, sendo executado um tijolo por vez. Cada tijolo utilizou cerca de 2,5 litros da mistura.

Cerca de dez litros da mistura eram colocados no silo que acompanha a prensa e um operador executava a prensagem através de um mecanismo específico do equipamento. Outro ponto importante da moldagem foi a retirada do tijolo da prensa, que teve de ser realizada com muito cuidado, pois a resistência inicial dos tijolos era muito baixa. Após sua retirada, o tijolo era depositado sobre um tablado de madeira. A sequência do procedimento pode ser visualizada na Figura 24:



*Figura 24: Processo de prensagem da mistura para fabricação de tijolos*

Um teste não normatizado, mas recomendado na prática de fabricação dos tijolos de solo-cimento é o teste do dedão. Esse teste consiste em pressionar a região central do tijolo recém moldado com o dedo polegar para aferir a resistência do mesmo. Se o tijolo sofrer demasiada deformação ou até mesmo se romper, quebra-se o tijolo, reinsere os restos na mistura e procura-se identificar e resolver o problema. Se o tijolo permanecer íntegro ele pode ser removido e transportado para a câmara de cura.

A capacidade máxima de fabricação de tijolos pela equipe envolvida foi de 100 tijolos por dia.

d) Cura dos tijolos:

Idealmente a cura dos tijolos de solo-cimento deveria ser realizada por meio de uma câmara úmida com controle de umidade e temperatura. A realidade na hora da fabricação no Laboratório de Engenharia Civil em Macaé era bem diferente. Sendo assim foi utilizada uma caixa d'água tampada com um balde de água em seu interior, como mostrado na Figura 25.



Figura 25: Cura dos tijolos na caixa d'água.

Sempre que possível tentou-se proteger a caixa d'água da luz direta do Sol. Assim, após a fabricação, os tijolos eram transportados para a caixa d'água e empilhados, identificados e logo em seguida a caixa era fechada. Os tijolos permaneciam nesse processo por 7 dias. Cabe mencionar que alguns tijolos fabricados foram danificados e perdidos, principalmente durante o transporte até a caixa d'água.

É importante ressaltar que o procedimento de cura dos tijolos é essencial para a obtenção da resistência a compressão final desejada.

Para a fabricação dos tijolos de solo-cimento foram seguidos todos os requisitos da NBR 8491/2012 e NBR 10833/2012. O traço 1:10 (1 parte de cimento e 10 partes de solo), por uma questão técnico-econômica, normalmente, é utilizado na prática da construção civil.

Em uma análise preliminar os dois solos extraídos das jazidas (solo 1 e 2) aparentaram ser utilizáveis para a fabricação dos tijolos. Diante disso foram fabricados, em uma primeira etapa, 45 tijolos com ambos os solos. A

Tabela 5 apresenta um resumo dos tijolos fabricados com traço 1:10.

Tabela 5: Tijolos de solo-cimento fabricados com traço 1:10.

<b>Tipo de solo</b>	<b>Quantidade de tijolos</b>
Solo 1	15 tijolos
Solo 2	15 tijolos
Solo 1 mais solo 2 (mesma proporção)	15 tijolos

A quantidade de tijolos de cada solo foi baseada na necessidade de realização dos ensaios para verificação das características dos mesmos (p. ex.: resistência mecânica aos 7, 14, 21 e 28 dias e absorção). Em cada um desses ensaios foram utilizados três exemplares de tijolo de solo-cimento.

A partir de conclusões durante a fabricação destes tijolos, juntamente com os resultados dos ensaios de laboratório com os solos tipo 1 e tipo 2, constatou-se que a mistura, na mesma proporção, dos dois tipos de solo apresentava o melhor comportamento.

Para avaliar requisitos de qualidade, custo, adequabilidade e materiais associados à durabilidade e resistência foram produzidos diferentes traços de solo-cimento (1:12; 1:10; 1:8 e 1:6). Assim, em uma segunda etapa foram fabricados mais 30 tijolos com a mistura de solo 1 e solo 2 na mesma proporção: 15 com traço 1:8 e 15 com traço 1:6. Em uma terceira etapa foram fabricados mais 30 tijolos, sendo 15 com traço 1:10 e 15 com traço 1:12. Foram necessários cerca de 400 kg de solo e praticamente 40 kg de cimento para a fabricação dos 105 tijolos destas etapas citadas.

Em todos os traços foi adicionada cal hidratada, na proporção de 2% da soma do volume de solo e cimento.

Também foram fabricados, em uma quarta etapa, tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita. As dosagens foram determinadas de acordo com os traços inicialmente sugeridos. O objetivo da fabricação dos tijolos com adição de pó de brita foi de aumentar a resistência mecânica. Optou-se pela utilização do traço 1:6:0,5 (cimento, solo e pó de brita, respectivamente) como primeira opção de teste. Posteriormente, foram produzidos tijolos com o traço 1:8:1, para análise comparativa da adição de pó de brita na mistura de solo-cimento.

### **3.5. ENSAIOS PÓS-FABRICAÇÃO**

A rotina de ensaios para a caracterização dos tijolos foi definida pelos seguintes procedimentos:

- Análise dimensional, segundo a NBR 8491/2012;
- Determinação da resistência à compressão com e sem pó de brita, avaliando-os de acordo com as especificações de materiais e métodos das normas ABNT NBR 8491/2012 e NBR 8492/2012: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio;
- Determinação da absorção de água, também segundo a NBR 8492/201;
- Ensaios de durabilidade, adaptando os procedimentos da NBR 13554/2012: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio;

Dos tijolos produzidos no Laboratório de Engenharia Civil em Macaé foram selecionados alguns para serem submetidos aos ensaios anteriormente descritos e assim realizar a determinação de suas características. Os ensaios de absorção foram

realizados e apresentados por LIMA (2018). Os ensaios foram realizados de acordo com a programação indicada na Tabela 6.

*Tabela 6: Programação dos ensaios indicando a quantidade de tijolos para cada ensaio em determinadas idades*

<b>Ensaio</b>	<b>Tipo</b>	<b>Procedimento</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Nº de tijolos</b>
Análise dimensional	Solo-cimento	NBR 8491/2012	28	2
Durabilidade	Solo-cimento	NBR 13554/2012	121	5
	Solo-cimento com adição de pó de brita		39	3
Resistência à compressão	Solo-cimento 1:8	NBR 8492/2012	121	20
	Solo-cimento 1:6		29	18
	Solo-cimento com adição de pó de brita 1:6:0,5		39	21
	Solo-cimento com adição de pó de brita 1:8:1		29	14

### 3.5.1. ANÁLISE DIMENSIONAL

De acordo com a norma NBR 8491/2012: “Tijolo de solo-cimento - Requisitos”, os tijolos de solo-cimento, tanto maciços quanto vazados, devem ter arestas vivas e, no caso de alvenaria aparente, recomenda-se que as arestas sejam chanfradas.

Quanto as dimensões, o tijolo deve possuir forma externa de um paralelepípedo retangular e, caso contenha furos, estes devem ter eixo perpendicular à superfície de assentamento e a espessura mínima das paredes no seu entorno deve ser mais de 25 mm, além da distância mínima entre os dois furos de 50 mm. As medidas também devem satisfazer à tolerância de  $\pm 1,0$  mm para o comprimento, largura e altura.

A Tabela 7 apresenta os valores das dimensões nominais dos tijolos, segundo a NBR 8491/2012.

*Tabela 7: Tipos e dimensões nominais (mm)*

<b>Tipos</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Largura</b>	<b>Altura</b>
A	200	100	50
B	240	120	70

Os tijolos podem apresentar dimensões diferentes das estabelecidas, desde que o tijolo permaneça com a altura menor que sua largura. Para análise dimensional foi utilizado um paquímetro analógico convencional de 30,00 cm com resolução de 0,1 mm.

### 3.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Segundo da NBR 8492/2012: Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água, para o ensaio de resistência à compressão simples, é necessário:

- Retirar sete corpos de prova de cada amostra;
- Cortar os corpos de prova ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão;
- Superpor, por suas faces maiores, as duas metades obtidas e as superfícies cortadas invertidas, ligando-as com uma camada fina de pasta de cimento Portland, pré-contraída (repouso de aproximadamente 30 min), com 2 mm a 3 mm de espessura, e aguardar o endurecimento da pasta. A resistência da pasta de cimento não pode ser menor que a do tijolo em ensaio;
- O corpo de prova deve apresentar suas faces planas e paralelas para que haja perfeito contato entre as superfícies de trabalho, podendo ser regularizadas por meio de retífica adequada ou capeamento com pasta de cimento. O capeamento não pode levar mais do que 3 min;
- Imersão por seis horas dos corpos de prova em água.
- O corpo de prova deve ser colocado diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira a ficar centralizado em relação à esta. No caso das dimensões dos pratos de apoio não forem suficientes para cobrir o corpo de prova, podem ser utilizadas placas de aço monolíticas entre os pratos da máquina e o corpo de prova, desde que as superfícies planas e rígidas dos pratos e placas de apoio não apresentem desníveis superiores a 0,08 mm para cada 400 mm e possua espessura de 35 mm para cargas de até 1 000 kN;
- A aplicação da carga deve ser uniforme e à razão de 500 N/s (50 kgf/s);
- A carga deve ser gradativamente elevada até ocorrer a ruptura do corpo de prova.

Algumas adaptações nos procedimentos mencionados na NBR 8492/2012 foram realizadas nessa pesquisa. Diferente da pesquisa apresentada por LIMA (2018), a aplicação de carregamento não foi uniforme e sob uma razão de 500 N/s. Isso aconteceu devido ao fato da prensa do Laboratório de Engenharia Civil de Macaé não possuir controle automático de velocidade. Outro fator relevante realizado diferente da NBR 8492/2012 foi com relação à quantidade de corpos de prova ensaiados para cada amostra. A norma solicita sete corpos de prova, mas na presente pesquisa, devido a limitação do uso de materiais e equipe, foram testados entre um e cinco corpos de prova para cada amostra.

Outros fatos importantíssimos realizados diferente da NBR 8492/2012 foram com relação a disposição dos tijolos a serem ensaiados e a imersão dos corpos de prova em água. A NBR 8492/2012 preconiza que os tijolos devem ser cortados ao meio, colados com argamassa e imergidos em água por, no mínimo, seis horas antes do ensaio de resistência à compressão. Esse tipo de procedimento foi denominado na presente pesquisa de “cortado, colado e imergido”. Além deste tipo de procedimento,

outros quatro procedimentos foram realizados: “inteiro único e seco”; “inteiro, colado e seco”; “inteiro, colado e imergido” e “cortado, colado e seco”.

O método “inteiro único e seco” consiste em comprimir um tijolo inteiro com suas arestas raspadas sem a imersão prévia e sem pasta de cimento, similar ao procedimento adotado para ensaio de resistência à compressão de blocos vazado de concreto (NBR 12118/2013: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio - revisado em 2014). Foi o método utilizado no início do trabalho devido a praticidade. A Figura 26 mostra a execução do ensaio por esse método.



*Figura 26: Ensaio com corpo de prova de tijolo único*

O método “Cortado, colado e imergido” refere-se ao especificado na NBR 8492/2012, enquanto que o “cortado, colado e seco” repete os mesmos procedimentos, exceto a imersão de, no mínimo, 6 horas antes do ensaio. O objetivo era avaliar a resistência à compressão dos tijolos secos, que é como se presume que se comportem na prática, uma vez que é usual em obras com este método construtivo de, mesmo optando-se por deixar a alvenaria aparente, aplicar-se impermeabilizante sobre a superfície das paredes. A Figura 27 mostra um ensaio com esse procedimento.



*Figura 27: Ensaio com corpo de prova composto por duas metades de tijolo justapostas e coladas com pasta de cimento.*

O método “inteiro, colado e imergido” repete o procedimento da norma, porém ao invés de cortar o tijolo, une 2 tijolos para formar um único corpo de prova. O método “inteiro, colado e seco” é análogo, porém sem a imersão do corpo de prova antes da compressão. O objetivo de realizar o ensaio dessa forma era o de compensar a irregularidade de certos tijolos que apresentassem superfícies ligeiramente desniveladas. A Figura 28 apresenta esse tipo de ensaio.



Figura 28: Ensaio com corpo de prova composto por dois tijolos justapostos e colados com pasta de cimento.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos ensaios de resistência à compressão realizados nessa pesquisa:

Tabela 8: Cronograma de Ensaio de Resistência à Compressão

<b>Tipo de tijolo</b>	<b>Tipo de procedimento</b>	<b>Número de corpos de prova</b>	<b>Idade das amostras</b>
Solo-cimento Traço 1:8	Inteiro único seco	5	121 dias
	Inteiro, colado e seco	3	
	Inteiro, colado e imergido	2	
	Cortado, colado e seco	3	
	Cortado, colado e imergido	3	
Solo-cimento Traço 1:6	Inteiro, colado e seco	3	29 dias
	Inteiro, colado e imergido	3	
	Cortado, colado e seco	3	
	Cortado, colado e imergido	3	
Solo-cimento com adição de pó de brita Traço 1:0,5:6	Cortado, colado e imergido	3	34 dias
	Cortado, colado e seco	3	
	Inteiro, colado e seco	1	
Solo-cimento com adição de pó de brita Traço 1:1:8	Cortado, colado e imergido	3	29 dias
	Cortado, colado e seco	3	
	Inteiro, colado e imergido	1	
	Inteiro, colado e seco	1	

Apesar da diferença de idade das amostras, considera-se que ambas possuem mais de 28 dias, que é o período necessário para que se estabilize a resistência dos tijolos. O cimento utilizado na pasta foi o CP V – ARI e as chapas de aço utilizadas foram as que acompanham a prensa manual.

### **3.5.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO**

A finalidade do ensaio de absorção é estimar a capacidade de percolação do bloco de solo-cimento. A norma utilizada nesse ensaio é a NBR 8492/2012. A aparelhagem indicada na norma e utilizada no ensaio está elencada a seguir:

- Balança de 10 kg de capacidade e sensibilidade de 1 g;
- Estufa capaz de manter uma temperatura entre 105 °C e 110 °C; e
- Tanque de imersão para submergir os corpos de prova em água à temperatura ambiente.

A metodologia consiste em secar os tijolos em estufa até atingir massa constante e depois esfriado até a temperatura ambiente. Devem ser pesados e então imergidos logo em seguida no tanque com água por 24 horas. Tendo decorrido o tempo, devem ser retirados do tanque, secos superficialmente com um pano e pesados novamente.

As amostras ensaiadas não devem apresentar média de valores de absorção de água maior do que 20%, nem valores individuais superiores a 22%.

Para maiores detalhes a respeito do ensaio de absorção dos tijolos, ver LIMA (2018).

### **3.5.4. ENSAIO DE DURABILIDADE**

De acordo com a NBR 13554/2012, os ensaios de durabilidade consistem em determinar a perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-cimento. A referida norma recomenda que os ensaios sejam realizados com corpos de prova moldados em cilindro pequeno (cilindro tipo Proctor). De acordo com a NBR 13554/2012, a aparelhagem para a realização do ensaio é composta de:

- Balança com capacidade de 10 kg e resolução de 1 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura de  $(71 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C;
- Tanque ou recipiente destinado à imersão dos corpos de-prova em água à temperatura ambiente;
- Escova de tiras de chapas de aço SAE 1020 nº 26, de 50,8 mm de comprimento por 1,6 mm de largura, reunidas em 50 grupos de dez tiras cada e montadas

em cinco filas longitudinais e dez transversais, em um bloco de madeira dura de 190 mm por 65 mm;

- Paquímetro ou outro instrumento com resolução de 0,2 mm, para medida da altura e dos diâmetros dos corpos-de-prova.

De acordo com a NBR 13554/2012 os seguintes procedimentos devem ser seguidos:

- i. Moldar três corpos-de-prova de acordo com a NBR 12024/2012: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento e identificá-los como nº 1, nº 2 e nº 3, determinando a umidade inicial ( $h_i$ ) do corpo-de-prova nº 1;
- ii. O corpo-de-prova nº 1 deve ser usado para obter a variação de umidade e a variação de volume durante o ensaio;
- iii. Os corpos-de-prova nº 2 e nº 3 devem ser usados para obter a perda de massa durante o ensaio (*Não esquecer de medir a massa e volume desses corpos de prova antes de iniciar o processo*);
- iv. Determinar o volume inicial ( $V_i$ ) do corpo-de-prova nº 1, imediatamente após a desmoldagem;
- v. Curar os corpos-de-prova por sete dias na câmara úmida;
- vi. Pesar e determinar o volume do corpo-de-prova nº 1 no final da cura;
- vii. Colocar os três corpos-de-prova imersos em água, removendo-os após 5 h;
- viii. Tirar o excesso da água superficial do corpo-de-prova nº 1 com um pano úmido e pesá-lo. Determinar sua massa e seu volume;
- ix. Colocar os três corpos-de-prova na estufa com a temperatura de  $(71 \pm 2) ^\circ\text{C}$  por 42 horas e então retirá-los;
- x. Determinar a massa e o volume do corpo-de-prova nº 1;
- xi. Escovar a superfície de cada um dos corpos de prova nº 2 e nº 3 com a escova de tiras de chapa de aço. Esta deve ser aplicada com seu eixo longitudinal paralelo ao eixo longitudinal do corpo-de-prova e paralelo às suas bases, de maneira a cobrir toda a superfície do corpo-de-prova. São requeridas 18 a 20 escovações verticais para cobrir a área lateral e quatro para cada uma das bases, sendo duas em uma direção e outras duas em uma direção perpendicular. O esfriamento e a escovação devem se dar no prazo de 1 h após a retirada da estufa;
- xii. O procedimento descrito em vii a xi, que constitui um ciclo de 48 h de molhagem e secagem, deve ser repetido mais cinco vezes;
- xiii. Após os seis ciclos, levar os três corpos-de-prova à estufa de temperatura entre  $105^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$  até atingir massa constante.;
- xiv. Os dados coletados permitem calcular a variação de umidade e a variação de volume do corpo-de-prova nº 1 e a perda de massa dos corpos-de-prova nº 2 e nº 3 após os seis ciclos.

A NBR 13554/2012 propõe a realização desses ensaios em corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. Assim, para tornar possível a execução dos ensaios de durabilidade nos tijolos de solo-cimento algumas adaptações foram necessárias.

A estufa utilizada nos ciclos de secagem não ficou em uma temperatura de 71 °C, conforme a norma, mas a aproximadamente 105 °C, devido a outros ensaios que ocorriam concomitantemente no laboratório.

O ensaio foi realizado com os tijolos de solo-cimento de traço 1:8. Foram ensaiados cinco tijolos, três dos quais foram realizadas as medições ao longo do ensaio, numerados de 1.1 a 1.3 e os outros dois utilizados para determinar a perda de massa ao final do ensaio – números 2 e 3 -, conforme a Figura 29.



*Figura 29: Numeração, imersão e escovação dos tijolos ensaio de durabilidade*

Os tijolos de solo-cimento utilizados para o ensaio possuíam 121 dias de idade. O volume dos mesmos foi calculado tomando a diferença do volume de água deslocada por cada um em um recipiente metálico cilíndrico - cujas dimensões são conhecidas - e com o auxílio de uma régua milimetrada, conforme mostrado na Figura 30.



*Figura 30: Determinação do volume dos tijolos*

Em seguida os corpos de prova foram colocados na estufa para o ciclo de secagem, como mostra a Figura 31:



Figura 31: Estufa com corpos de prova

O mesmo procedimento foi adotado para a realização do ensaio com tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita traço 1:6:0,5, com a única diferença que, ao invés de utilizados 5 tijolos, foram utilizados 3, numerados de 1 a 3.

### 3.5.5. COMPRESSÃO DE PAREDES DE PEQUENO PORTE

A etapa seguinte do trabalho foi a produção de tijolos para a execução e ensaios de painéis de alvenaria estrutural. Os tijolos com traço 1:6:0,5 (cimento, solo, pó de brita) foram escolhidos para a execução desse teste.

Foram produzidos 51 tijolos para a confecção de painéis de parede com 50x50 cm, conforme a norma BS EN 772-1: *Methods of test for masonry units Part 1: Determination of compressive strength* (Métodos para teste de unidades de alvenaria parte 1: Determinação da resistência à compressão). Foi utilizada uma norma britânica devido a ausência de normas nacionais para esse tipo de ensaio. Três painéis foram produzidos com a finalidade de avaliar o comportamento das paredes submetidas à compressão axial.

Como não foram produzidos tijolos com a forma de meio tijolo, foi necessário cortar tijolos na metade para garantir a alternância e a amarração do painel.

As paredes foram construídas no NUMATS. Fez-se uso de fio de prumo, régua e nível para garantir a boa verticalidade dos painéis. Os tijolos foram assentados em amarração, com grauteamento e argamassa de assentamento. O graute utilizado para preenchimento de um dos quatro furos presentes em cada painel foi de traço 1:4:2 (cimento, solo e brita), com fator de água-cimento de 2. O solo utilizado foi o mesmo do dos tijolos (solo 1 mais solo 2 na proporção de 1:1). O graute era colocado a cada três fiadas levantadas, em poucas quantidades de cada vez e adensado com o auxílio de uma barra metálica. A argamassa utilizada foi de traço 1:1:6 (cimento, cal e areia), com fator de água-cimento 1,5. Para maiores detalhes dos ensaios realizados com o graute e a argamassa ver LIMA (2018).

Segundo GRANDE (2003), a argamassa, além de unir os tijolos, quando devidamente aplicada, garante uma melhor transmissão dos esforços e regularização

das imperfeições dimensionais dos encaixes dos tijolos. Portanto, é recomendável a utilização de assentamento.

O solo para a produção do graute foi destorroado e peneirado. A mistura com o cimento e brita foi feito em masseira. A água foi adicionada logo em seguida. A figura Figura 32 mostra o processo de fabricação do graute.

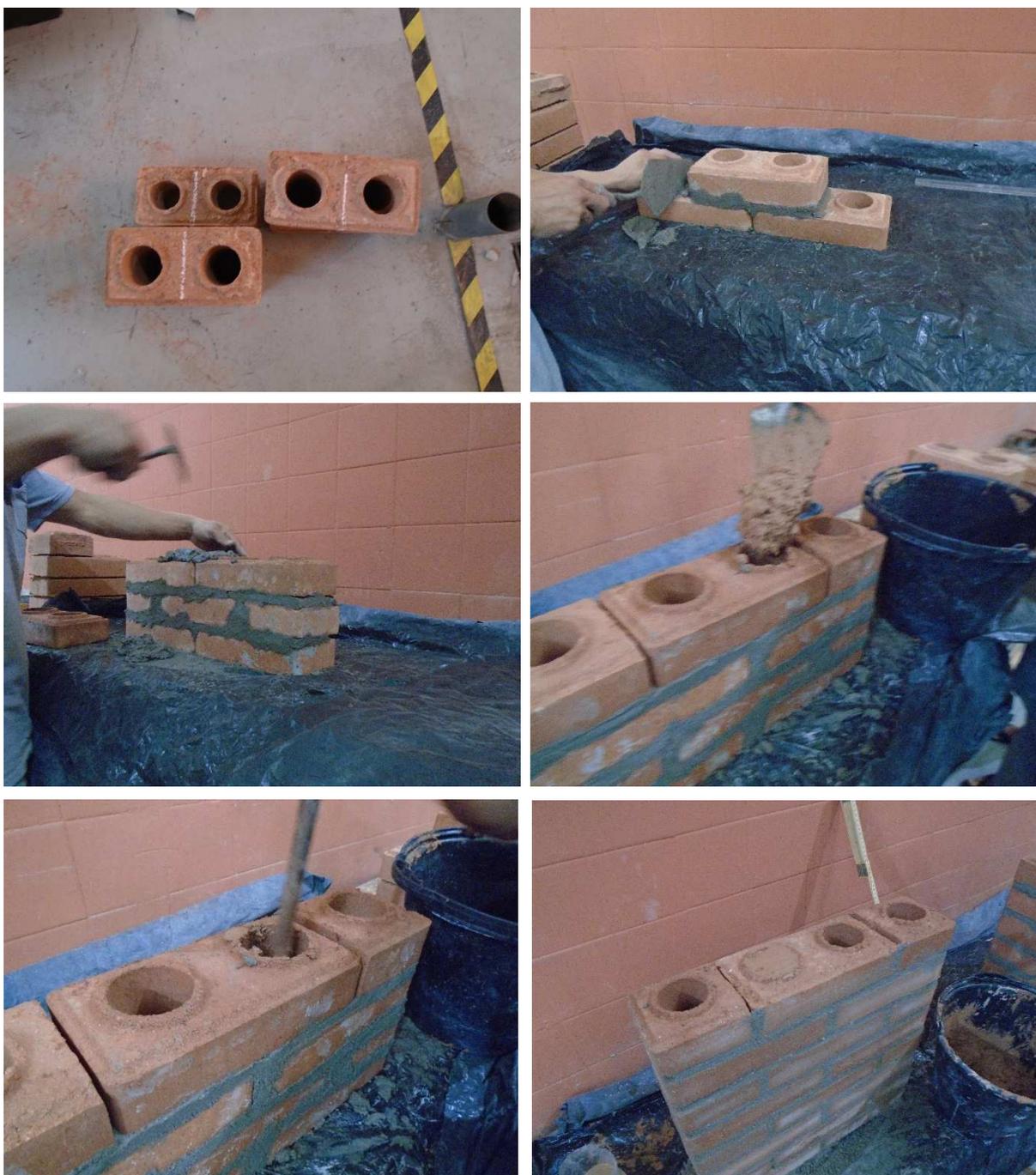


Figura 32: Processo de fabricação do graute. Destorroamento do solo; Peneiramento; Solo, brita e cimento em masseira; Mistura dos componentes; Adição de água na mistura; Graute com consistência adequada.

Após a confecção dos painéis foi realizado o capeamento dos mesmos. O capeamento é necessário para proporcionar uma superfície de contato plana e

nivelada para receber a viga metálica que, por sua vez, é necessária para transmitir o esforço de compressão da viga por todo o comprimento da alvenaria. Para tanto foi utilizada a argamassa de assentamento dos tijolos.

A Figura 33 mostra a sequência de execução dos painéis.



*Figura 33: Processo de montagem dos painéis. Marcação dos tijolos na metade para corte; Montagem (parte 1); Montagem (parte 2); Inserção de graute; Adensamento; Resultado final.*

Todas as paredes foram erguidas sobre uma bancada próxima à prensa a ser utilizada no teste, com exceção da primeira, que foi erguida na própria base da prensa.

Após a montagem dos painéis medidos para aferir se suas dimensões estavam de acordo com a recomendada pela EN 772-1, conforme pode ser visualizado na Figura 34.



*Figura 34: Verificação dimensional dos painéis.*

Os painéis foram levados até à posição de teste na prensa através de uma base móvel e posicionados como mostra a Figura 35



Figura 35: Posição dos painéis na prensa.

Um software conectado à prensa fornece a magnitude e tempo de aplicação da carga e o deslocamento da parede. Um gráfico força (kN) x deslocamento (mm) é gerado automaticamente, como mostra a Figura 36.

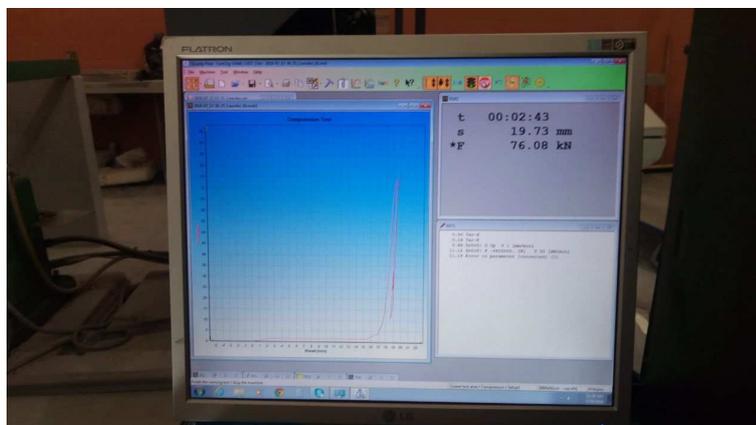


Figura 36: Monitoramento da compressão do painel.

O ensaio foi realizado de forma que a compressão do painel durasse cerca de 30 minutos.

Após o fim do ensaio, marcado pela ruptura da parede, notou-se que a mesma rompeu ao longo de seu eixo, sinal de que a transmissão dos esforços foi suficientemente homogênea, conforme mostrado na Figura 37.



Figura 37: Ruptura do painel.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. GRANULOMETRIA

O percentual retido em cada peneira foi calculado segundo a Equação (2) e o percentual passante em cada peneira foi tomado subtraindo o percentual retido da amostra total, como mostra a Equação (3).

$$PR = \frac{MR}{MTS} \cdot 100 \quad (2)$$

$$PP = 100 - PR \quad (3)$$

Em que

- PR = Percentual retido acumulado de solo em cada peneira;
- PP = Percentual passante de solo em cada peneira;
- MR = Massa retida acumulada de solo em cada peneira;
- MTS = Massa total de solo.

O gráfico exibido na Figura 38 apresenta a composição granulométrica dos solos 1 e 2:

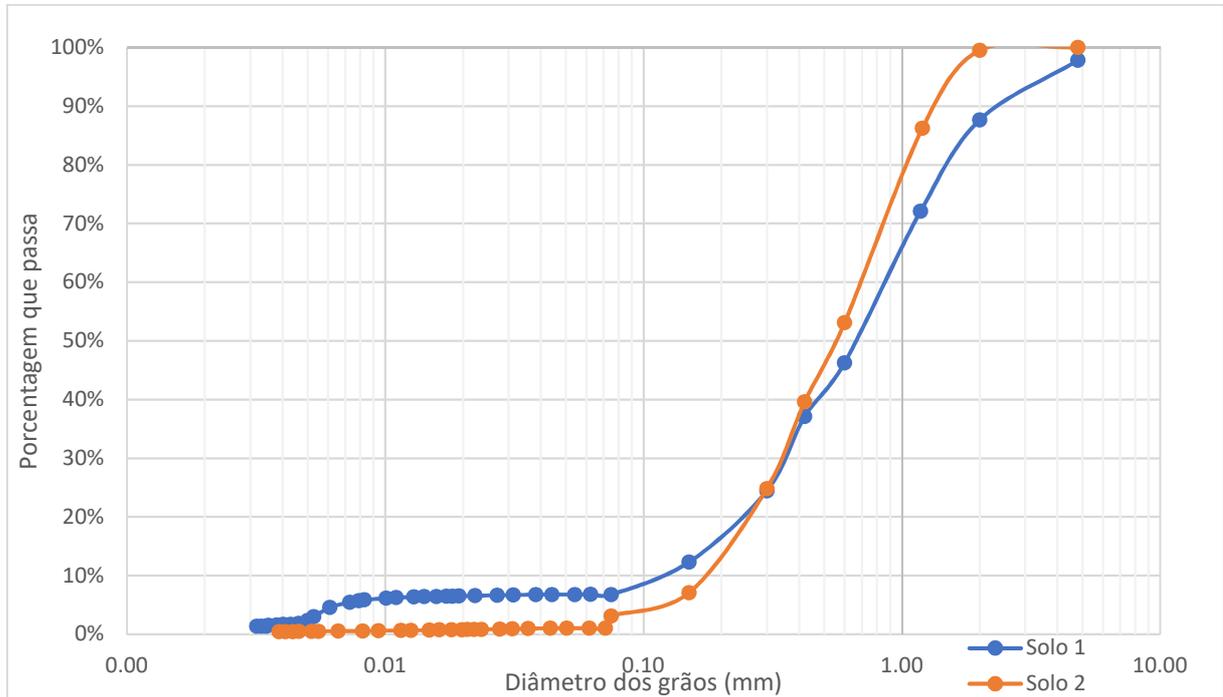


Figura 38: Curva granulométrica dos solos 1 e 2

Analisando o gráfico é possível notar que 100% do material de ambos os solos passa na peneira #4 (4,8 mm), conforme as recomendações para a produção de tijolos de solo cimento da NBR 10833/2012, e que aproximadamente 7,5% do solo 1 e 1% do solo 2 passa na peneira #200 (0,075 mm), abaixo da faixa de 10%-50%, recomendado pela NBR 10833/2012.

As tabelas com os valores da granulometria das amostras podem ser encontradas no Apêndice 1.

A curva granulométrica do pó de brita foi cedida pela própria empresa que também cedeu o material e foi realizada somente pelo processo de peneiramento. A curva granulométrica deste material está mostrada na Figura 39:

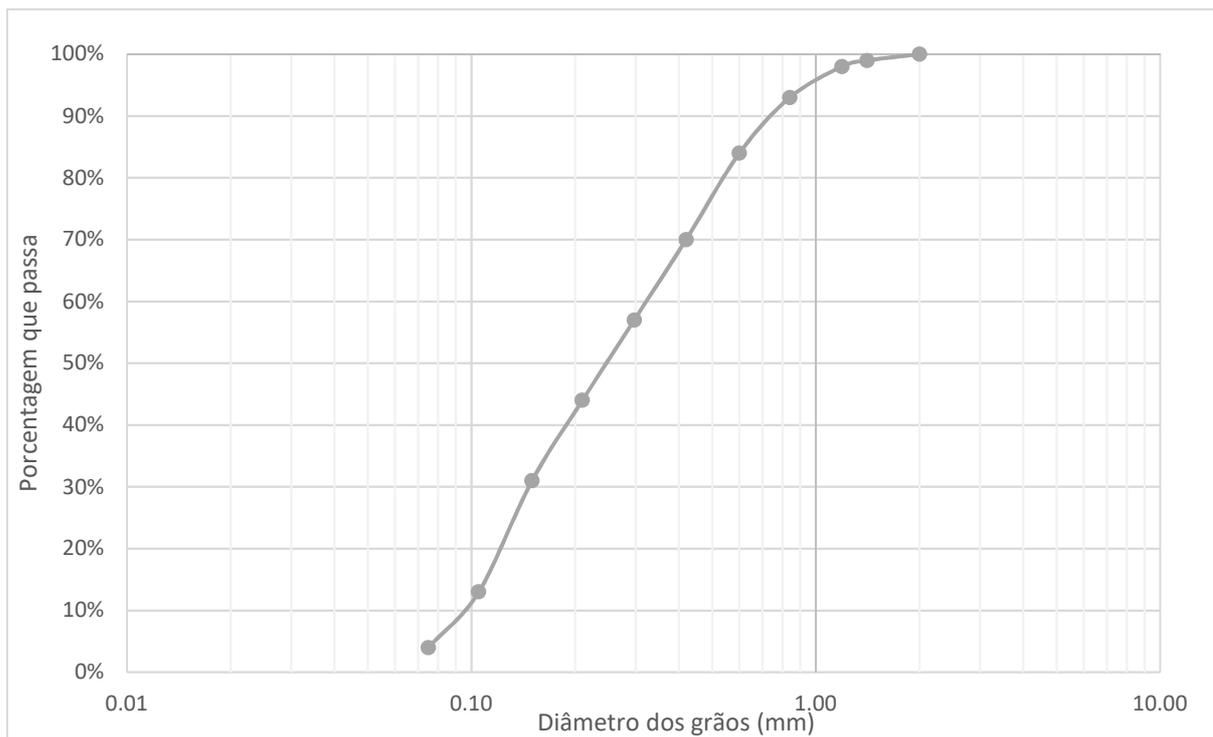


Figura 39: Curva granulométrica do pó de brita

É possível aferir que 100% do material passa pela peneira #10 (4,8 mm) e que, pelo tamanho das partículas de pó de brita, o mesmo se equipara a um solo arenoso.

#### 4.2. LIMITES DE ATTERBERG

Os resultados dos ensaios para determinação do limite de liquidez para o solo 1 estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados do ensaio de limite de liquidez para solo 1

Nº de golpes	Umidade (%)
29	42,6
25	43,1
42	36,9
17	51,9

Os resultados dos ensaios para determinação do limite de liquidez para o solo 2 estão mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados do ensaio de limite de liquidez para solo 2

Nº de golpes	Umidade (%)
34	34,3
56	31,1
18	49,0
13	47,6

Os resultados do ensaio para determinação do limite de liquidez para o solo 1 e o solo 2 foram dispostos no gráfico da Figura 40, em que no eixo vertical estão dispostos os valores de umidade e no eixo horizontal o número de golpes em escala logarítmica.

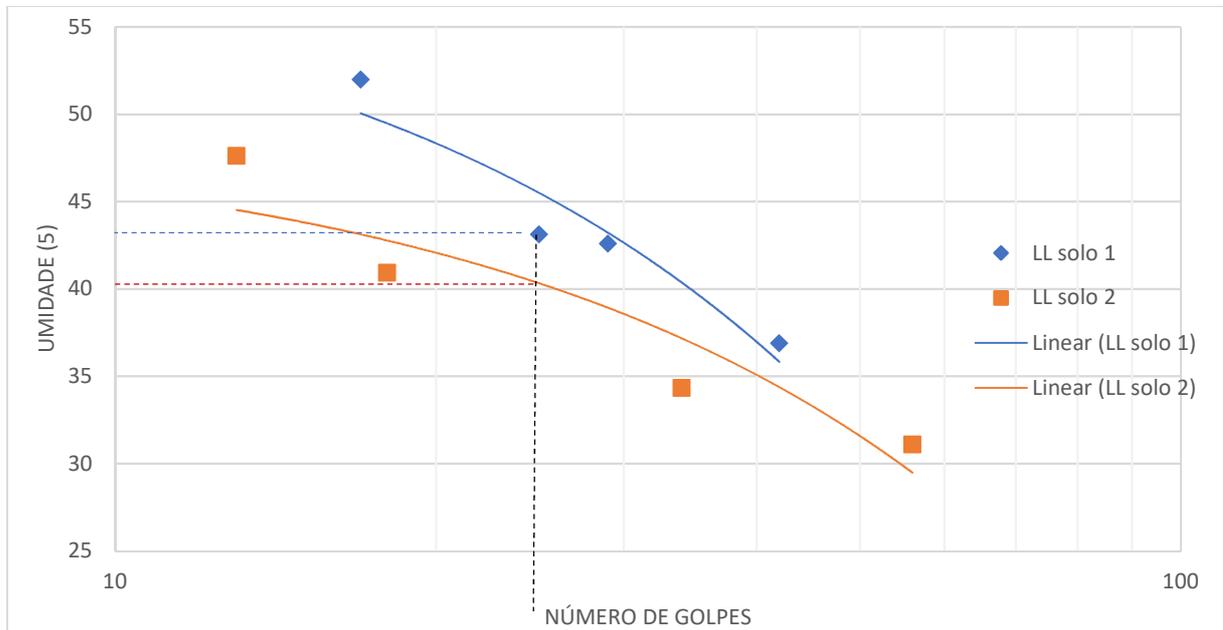


Figura 40: Curva de compactação dos solos 1 e 2

O limite de liquidez é definido como a umidade com que a fenda de 1 cm de comprimento se fecha com 25 golpes do aparelho de Casagrande. Ao traçar as retas correspondentes ao número de 25 golpes para o solo 1 e solo 2 no gráfico da Figura 40 foi possível observar que o solo 1 apresentou limite de liquidez de 43%, enquanto que o solo 2 de 40%.

É possível concluir que ambos os solos apresentam limite de liquidez dentro do limite estabelecido na NBR 10833/2012, ou seja, menor do que 45 %.

Devido à incompatibilidade dos resultados não foi possível aferir o limite de plasticidade dos solos.

#### 4.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

Os resultados do ensaio, para cada picnômetro, estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do ensaio de determinação da densidade real dos grãos.

Solo	Solo 1				Solo 2			
Picnômetro	1	2	3	4	5	6	7	9
Massa do picnômetro (g)	51,93	49,08	47,42	50,46	46,45	51,12	48,47	48,49
Picnômetro + Solo (g)	68,16	70,42	65,18	71,43	68,29	71,6	73,7	73,11
Picnômetro + Solo + Água (g)	167,27	167,50	162,12	165,79	165,71	168,88	169,43	167,24
Picnômetro + Água	157,04	154,00	150,85	152,47	151,93	155,94	153,49	151,72
Solo (g)	16,23	21,34	17,76	20,97	21,84	20,48	25,23	24,62
Água (g)	105,11	104,92	103,43	102,01	105,48	104,82	105,02	103,23
Temperatura (°C)	24	24	24	24	24	24	24	24
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	2,71	2,73	2,73	2,70	2,71	2,71	2,70
MÉDIA (g/cm <sup>3</sup> )	2,72				2,70			

A densidade da água à 24 °C foi aferida em 0,99732 g/cm<sup>3</sup>.

A densidade real dos grãos é calculada de acordo com a Equação (4)

$$\gamma_s = \frac{m_s}{m_s + m_a - m_{as}} \cdot \gamma_w \quad (4)$$

Em que:

- $\gamma_s$ = densidade real dos grãos;
- $m_s$ = massa do solo seco;
- $m_a$ = massa do picnômetro cheio de água destilada;
- $m_{as}$ = massa do picnômetro cheio de água e solo;
- $\gamma_w$ = massa específica da água na temperatura do ensaio.

A densidade real dos solos foi aferida em 2,72 g/cm<sup>3</sup> e 2,70 g/cm<sup>3</sup> para os solos 1 e solo 2, respectivamente, que são valores típicos para solos arenosos.

O pó de brita utilizado neste trabalho, de acordo o relatório da empresa Jundiá Mineração, possui massa específica de 2,70 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.4. ENSAIO DE RETRAÇÃO

Após os sete dias completos do solo na caixa é recomendável que não haja fissuras no solo nem que o mesmo se afaste por mais que 20 mm da canaleta. No entanto, pode ser identificado o surgimento de trincas e retração nas massas de solo, como pode ser visto na Figura 41.

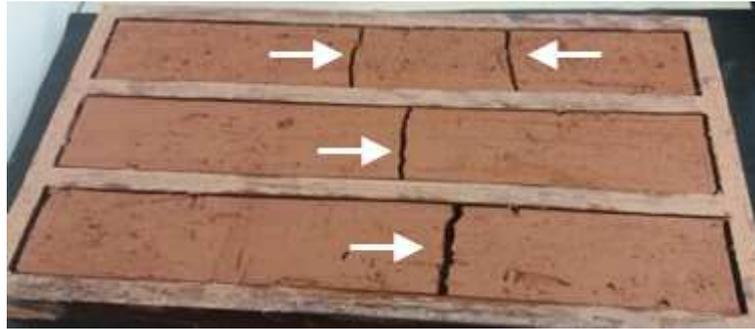


Figura 41: Ensaio de retração do solo: Resultado.

Tanto as trincas quanto os afastamentos das extremidades da canaleta foram medidos com paquímetro digital de 15,00 cm de comprimento com resolução de 0,1 mm, como mostra a Figura 42.



Figura 42: Medição das trincas e afastamentos.

Foram realizadas três medições nas trincas e afastamentos. Uma em cada extremidade e uma na região central. A Figura 43 mostra os resultados obtidos.

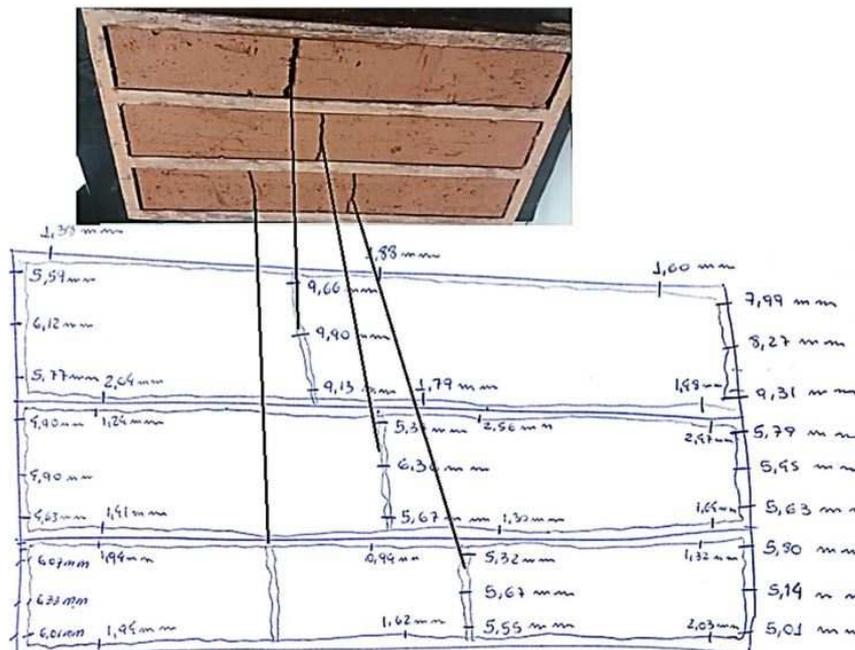


Figura 43: Resultado das medições do ensaio de retração.

É possível observar que o ensaio com o solo em questão apresentou trincas e afastamento das extremidades da canaleta na faixa de 0,99 mm a 9,31 mm, desqualificando-o no teste. No entanto, a estabilização do solo com cimento tende a compensar os efeitos da retração do solo.

#### 4.5. ANÁLISE DIMENSIONAL

Os tijolos produzidos e utilizados neste trabalho possuem as dimensões nominais mostradas na Tabela 12.

*Tabela 12: Dimensões nominais dos tijolos (mm)*

<b>Comprimento</b>	<b>Largura</b>	<b>Altura</b>
250,2	125,5	61,9

Para aferição das medidas foi utilizado paquímetro com resolução de 0,1 mm de 30 cm de comprimento.

É observado que eles satisfazem a proporção sugerida pela norma (1:2:4 – altura, largura, comprimento, respectivamente).

Vale ressaltar que no início da pesquisa, devido ao fato de que a produção de tijolos ainda estava em processo de aprendizagem e à limitação técnica da prensa manual, alguns tijolos apresentaram irregularidades dimensionais tais como diferenças de cerca de 4 mm entre uma extremidade e outra.

Os valores das medições de cada corpo de prova podem ser visualizados no Apêndice 3.

#### 4.6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão dos tijolos é tomada dividindo-se a carga aplicada no momento da ruptura pela área do corpo de prova. Todos os tijolos foram com idade mínima de 28 dias e deixados na câmara úmida nos primeiros 7 dias, conforme exposto no item 3.4

A média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados do ensaio de compressão para tijolos de solo-cimento.

<b>Tipo de tijolo</b>	<b>Método</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Incerteza (MPa)</b>	<b>Idade (dias)</b>
Solo-cimento 1:6	Inteiro, colado e seco	2,51	± 0,32	28
	Inteiro, colado e imergido	1,37	± 0,08	
	Cortado, colado e seco	2,01	± 0,22	
	Cortado, colado e imergido	1,35	± 0,13	
Solo-cimento 1:8	Inteiro único	1,98	± 0,26	121
	Inteiro, colado e seco	0,89	± 0,09	
	Inteiro, colado e imergido	0,60	± 0,04	
	Cortado, colado e seco	1,24	± 0,01	
	Cortado, colado e imergido	0,52	± 0,05	

A média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados do ensaio de compressão para tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita.

<b>Tipo de tijolo</b>	<b>Método</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Incerteza (MPa)</b>	<b>Idade (dias)</b>
Solo-cimento com adição de pó de brita 1:6:0,5	Inteiro, colado e seco	1,53	± 0,04	28
	Cortado, colado e seco	1,68	± 0,09	
	Cortado, colado e imergido	1,50	± 0,23	
Solo-cimento com adição de pó de brita 1:8:1	Inteiro, colado e seco	0,95	*	28
	Inteiro, colado e imergido	0,72	*	
	Cortado, colado e seco	1,34	± 0,12	
	Cortado, colado e imergido	0,75	± 0,07	

\* Não foi possível calcular a incerteza por não haver medições suficientes.

De acordo com a NBR 8491/2012 a média dos valores de resistência à compressão não pode ser inferior a 2,0 MPa (20 kgf/cm<sup>2</sup>) nem valor individual menor que 1,7 MPa (17 kgf/cm<sup>2</sup>), com idade mínima de sete dias. Os tijolos de solo-cimento de traço 1:6 através do método “inteiro, colado e seco” foram os únicos que atenderam às recomendações da NBR 8491/2012.

Cabe ressaltar que os tijolos de solo-cimento de traço 1:8 ensaiados no NUMATS apresentaram resistência à compressão maior que 2,0 MPa, como recomenda a NBR 8491/2012, provavelmente devido ao maior controle tecnológico da produção e cura dos tijolos.

É possível observar que os tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita, de traço 1:8:1 apresentaram, em todos os métodos ensaiados, maior resistência em comparação com os tijolos de solo-cimento de traço 1:8. O mesmo não pode ser observado nos tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita de traço 1:6:0,5 em relação aos de solo-cimento de traço 1:6.

Ao longo do projeto foi observado que os ensaios realizados com tijolos inteiros apresentavam maior desvio padrão em comparação com os realizados com metades de tijolo justapostas, provavelmente devido aos desníveis presentes na superfície, que é duas vezes maior.

Os valores individuais de cada ensaio podem ser encontrados no Apêndice 4.

#### 4.7. ABSORÇÃO

A absorção de água de cada tijolo é obtida através da Equação (5).

$$A = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

- A = Absorção (%);
- $M_a$  = Massa do tijolo saturado (g);
- $M_s$  = Massa do tijolo seco (g).

Os resultados do ensaio estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15: Ensaio de absorção solo-cimento – Resultados.

Solo	Proporção cimento:solo	PESO SECO (KG)	PESO UMIDO (KG)	A%
S1+S2	1/10	2,350	2,890	23,0
S1+S2	1/6	2,800	3,415	22,0
S1+S2	1/8	2,395	2,910	21,5
S1	1/10	2,410	2,955	22,6
S2	1/10	2,310	2,840	22,9

De acordo com a NBR 8491/2012 a média dos valores de absorção não deve ultrapassar 20% nem conter valores superiores a 22%. Nesse caso apenas os tijolos de solo-cimento de traço 1:6 e 1:8, com os solos 1 e 2 misturados na mesma proporção atendem às recomendações.

É possível notar que a absorção de água dos tijolos diminui com o aumento da quantidade de cimento no traço.

Mais detalhes do ensaio de absorção dos tijolos podem ser encontrados no trabalho de LIMA (2018).

#### 4.8. DURABILIDADE

A perda de massa dos tijolos é aferida de acordo com as equações 6, 7 e 8:

$$A = \frac{(M_{f(1)} - M_{i(1)})}{M_{i(1)}} \quad (6)$$

$$M_{fc(2,3)} = \frac{M_{f(2,3)}}{(A + 1,00)} \quad (7)$$

$$P_{m(2,3)} = \frac{(M_{i(2,3)} - M_{fc(2,3)})}{M_{i(2,3)}} \quad (8)$$

Em que:

- A = Água retida no corpo-de-prova nº 1 (%);
- $M_{f(1)}$  = Massa seca final do corpo-de-prova nº 1 após atingir massa constante (g);
- $M_{i(1)}$  = Massa seca inicial do corpo-de-prova nº 1 (g);
- $M_{fc(2,3)}$  = Massa seca final corrigida dos corpos-de-prova nº 2 e nº 3 (g);
- $M_{f(2,3)}$  = Massa seca final dos corpos-de-prova nº 2 e nº 3 (g);
- $P_{m(2,3)}$  = Perda de massa dos corpos-de-prova nº 2 e nº 3 (g);
- $M_{i(2,3)}$  = Massa seca inicial dos corpos-de-prova nº 2 e nº 3 (g);

Para os tijolos de solo-cimento, a variação de volume e massa dos corpos de prova no decorrer do ensaio estão dispostos no gráfico da Figura 44 e Figura 45, respectivamente, nas quais o número no eixo horizontal refere-se ao ciclo de molhagem e secagem e as letras i e f às medidas iniciais (após a molhagem) e finais (após a secagem), respectivamente.

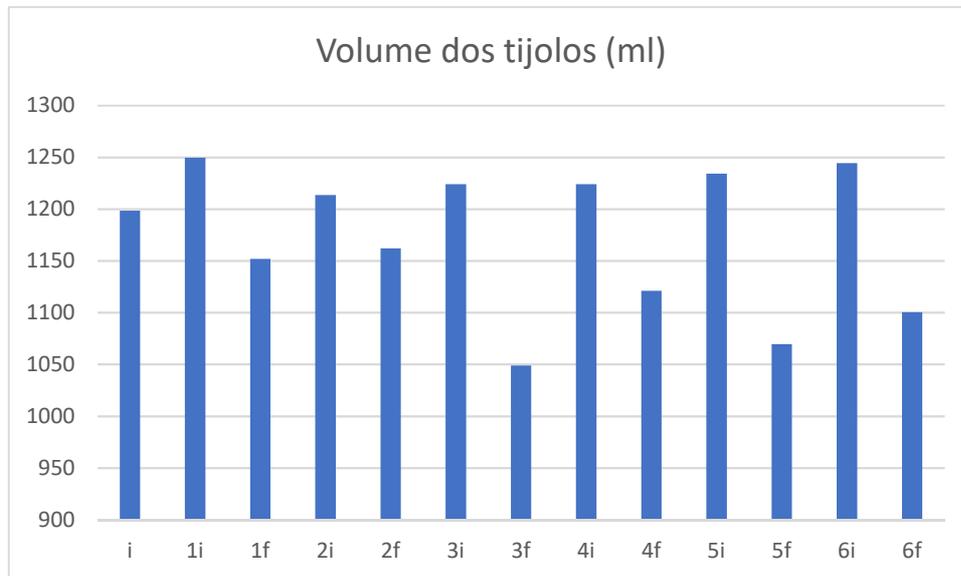


Figura 44: Ensaio de Durabilidade: Variação de volume dos tijolos de solo-cimento.

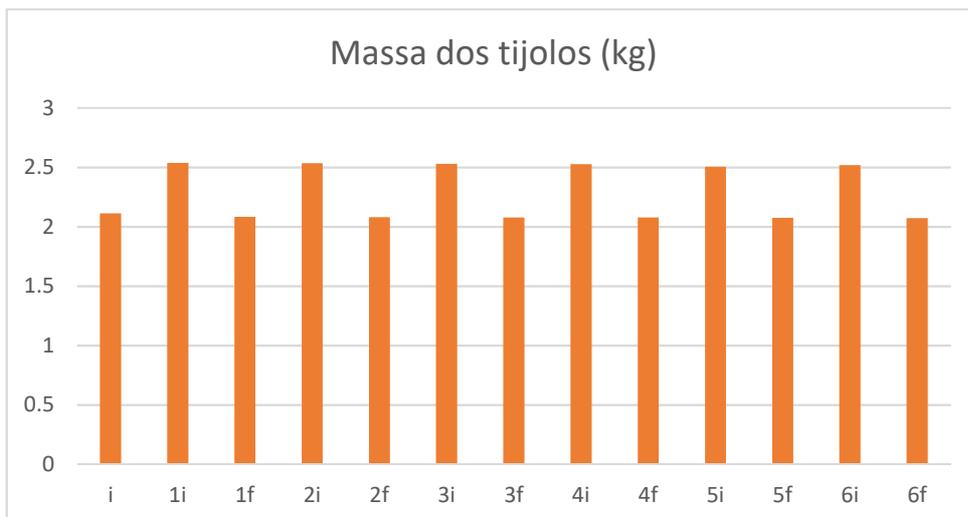


Figura 45: Ensaio de Durabilidade: Variação da massa dos tijolos.

A variação do volume e massa referente aos tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita estão dispostos nos gráficos da Figura 46 e Figura 47.

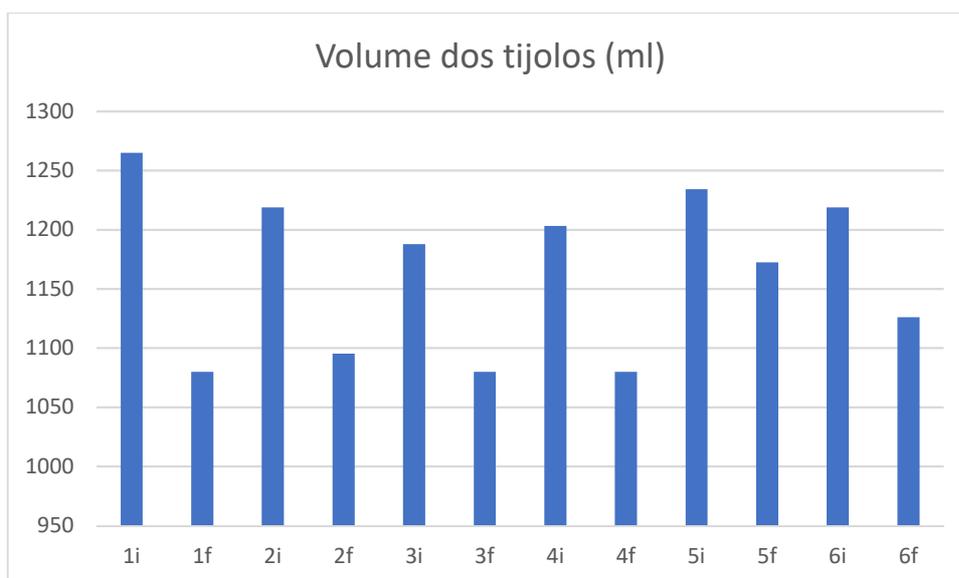


Figura 46: Ensaio de Durabilidade: Variação do volume dos tijolos de solo cimento com adição de pó de brita.

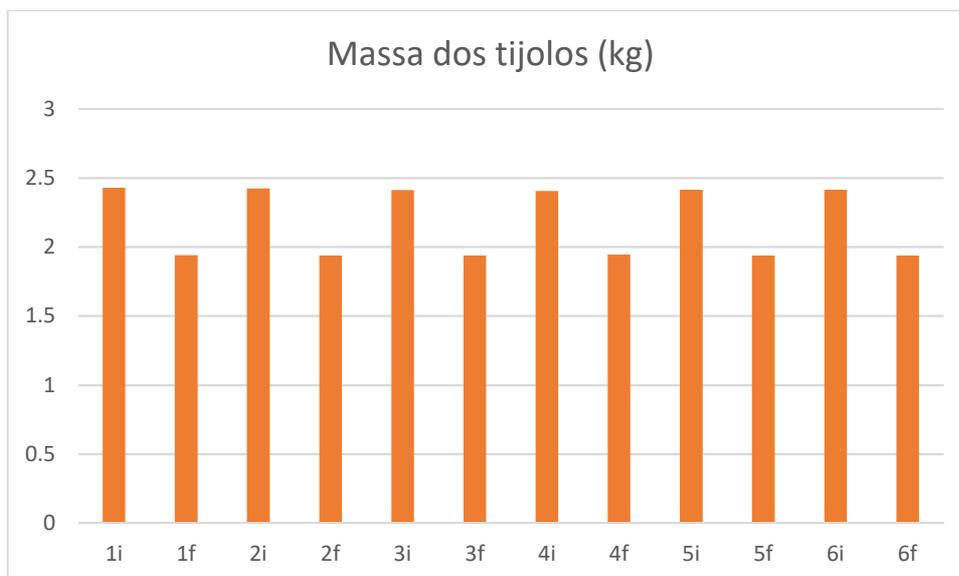


Figura 47: Ensaio de Durabilidade: Variação da massa dos tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita.

É notório o aumento de massa – aproximadamente 500 g – após os ciclos de molhagem em relação aos ciclos de secagem, obviamente devido à água absorvida pelos tijolos. Essa variação também é observada na variação de volume, apesar do método de medição proporcionar demasiada imprecisão nos resultados.

Conforme a ABCP apud GRANDE (2003), a perda de massa de tijolos de solo-cimento, depois de submetidos aos ciclos de imersão e secagem, não deve ser superior a 10%. Constatou-se, portanto, que todos os tijolos foram aprovados em relação a esse limite, uma vez que a perda de massa dos tijolos de solo-cimento e de solo-cimento com adição de pó de brita foi de 4,63% e 1,62%, respectivamente.

#### 4.9. COMPRESSÃO DE PAREDES DE PEQUENO PORTE

De acordo com a BS EM 772-1 o resultado do teste de cada painel deve ser calculado dividindo-se o maior valor da carga aplicada pela área do mesmo, com resolução mínima de 0,1 MPa. A resistência mecânica dos mesmos está disposta na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados das resistências dos painéis de alvenaria.

Parede	Força na ruptura (kN)	Resistência à compressão (MPa)
1	84,32	1,67
2	86,28	1,71
3	105,96	2,10
Média		1,83
Desvio padrão		0,24

É possível notar que a resistência dos painéis superou, em média, 22% da resistência dos tijolos quando testados de acordo com a NBR 8492/2012. Essa diferença torna-se ainda menor quando comparada com a resistência dos corpos de prova executados de acordo com o método “cortado, colado e seco”, sem imersão prévia, caindo para 9,1%.

Esse aumento da resistência à compressão do painel deve-se, principalmente a presença da coluna de graute formada pelo grauteamento de um dos furos do painel.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

De acordo com o que foi exposto, o objetivo da pesquisa era a avaliação das características de tijolos de solo cimento com e sem adição de pó de brita fabricados com prensa manual e painéis de alvenaria erguidos com os mesmos, tudo sob uma perspectiva de economia e de sustentabilidade no uso de técnicas e materiais e didática para orientação de alunos, pesquisadores e população a respeito deste método construtivo.

As características dos tijolos foram avaliadas por meio de uma metodologia baseada em procedimentos de ensaios laboratoriais fundamentados em normas técnicas, recomendações práticas e adaptações devido às limitações técnicas.

É possível levantar uma série de considerações dos resultados obtidos. Dentre elas uma de inquestionável importância é o controle tecnológico na fase de cura dos tijolos, fator este determinante para o ganho de resistência dos mesmos.

Observou-se também a discrepância entre valores de resistência de tijolos analisados com e sem imersão prévia de 6 horas, que chega a 137% entre os métodos “cortado, colado e seco” e “cortado, colado e imergido” nos tijolos de solo-cimento. Tal diferença levanta o questionamento da necessidade do procedimento, sabido da importância de se obter valores condizentes com a situação de utilização dos tijolos, tendo em vista que mesmo não aplicando uma camada de revestimento na alvenaria, ou seja, optar-se por deixar os tijolos aparentes, é de praxe que se aplique uma camada de resina hidrofugante nos mesmos.

Dos tijolos fabricados no Laboratório de Engenharia Civil do Campus Macaé os únicos que alcançaram o valor médio de resistência de 2,0 MPa com nenhum valor individual menor que 1,7 MPa, de acordo com a NBR 8491/2012, foram os de solo-cimento com traço 1:6 através do método inteiro, colado e seco. No entanto, tijolos produzidos com o traço 1:8 no laboratório do NUMATS obtiveram resultados satisfatórios. Isso pode ser reflexo do maior controle tecnológico no processo de moldagem dos tijolos, uma vez que no NUMATS dispunha-se de um local fechado para trabalho e câmara úmida para cura dos tijolos com controle de temperatura e umidade.

É observado também que a durabilidade dos tijolos alcançou valores mais que satisfatórios, considerando que o ensaio é indicado para solos que serão utilizados em obras de pavimentação, devendo oferecer resistência à abrasão e baixa absorção de água, condição esta que não se espera de edificações pois é usual que as paredes de tijolos passem por um processo de impermeabilização ou acabamento.

A adição de pó de brita na mistura de solo-cimento de traço 1:6:0,5 gerou perda de resistência em comparação com os tijolos de solo-cimento de traço 1:6.

A adição de pó de brita na mistura de solo-cimento, no traço 1:8:1 obteve um ganho de resistência da ordem de 20%, comparando-se com os tijolos de solo-cimento de traço 1:8, analisando todos os métodos de ensaio. O mesmo não foi observado nos tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita de traço 1:6:0,5 em relação aos tijolos de solo-cimento de traço 1:6, ocorrendo

Com relação aos painéis de alvenaria, é possível observar um ligeiro ganho de resistência com relação aos tijolos testados conforme a NBR 8492/2012. Isso ocorre, principalmente, devido à presença de colunas de graute em um dos furos no painel.

É indiscutível que a utilização de solo-cimento como matéria-prima de tijolos modulares é um território vasto de pesquisa e que proporciona uma infinidade de alternativas e abordagens para futuras pesquisas, tais como:

- Avaliação das características de tijolos variando-se o tipo de solo e cimento a serem utilizados;
- Estudo da resistência mecânica de tijolos de solo-cimento com adição de pó de brita com diferentes proporções.
- Avaliação da adição de materiais reciclados à mistura quanto ao ganho resistência mecânica e durabilidade;
- Elaboração de métodos de cálculo para análise estrutural com alvenaria auto-portante de tijolos de solo-cimento;
- Estudo de material aglomerante, pozolânico e natural alternativo ao cimento Portland;
- Avaliação da resistência de tijolos ao longo do tempo;
- Estudo da influência da quantidade de cintas de amarração verticais em paredes na resistência mecânica do painel;
- Avaliação química do mecanismo de interação do solo-cimento em função dos materiais que compõe essa mistura e suas interfaces;

## REFERÊNCIAS

NBR 5732/1991: Cimento Portland Comum

NBR 5733/1991: Cimento Portland com alta resistência inicial

NBR 5735/1991: Cimento Portland de alto forno

NBR 5736/1980: Cimento Portland Pozolânico

NBR 5737/1992: Cimentos Portland resistentes a sulfatos

NBR 6457/2016: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização

NBR 6502/1995: Rochas e Solos

NBR 7180/1984: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade

NBR 8491/2012: Tijolo de solo-cimento – Requisitos

NBR 8492/2012: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio

NBR 10833/2012: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento (versão corrigida 04.04.2013)

NBR 11578/1991: Cimento Portland Composto

NBR 12024/2012: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos

NBR 12118/2013: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio - revisado em 2014

NBR 12989/1994: Cimento Portland Branco

NBR 13116/1994: Cimento Portland de baixo calor de hidratação

NBR 13554/2012: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio

NBR 7181/2016: Solo – Análise granulométrica

ANDRADE, G., OLIVEIRA, S., EGYPTO, A. B. “Materiais de construção – Cerâmica”; Architectando. Disponível em <<http://arquitectandoufpb.blogspot.com/2012/06/materiais-de-construcao-ceramica.html>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.

ANGST, E. R. Análise comparativa entre tijolos cerâmicos e tijolos de solo-cimento. 2013.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração. Oficina de Textos, 2015. ISBN 8579751039.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017. ISSN:2448-0959

BS EN 772-1: Methods of tes for masonry units Part 1: Determination of compressive strength. 2001.

CHIOSSI, N. Geologia de engenharia. Oficina de Textos, 2015. ISBN 8579751667.

COSTA, Bruno Barzellay Ferreira da. Tecnologia do concreto: Notas de Aula. 01 aug. 2015, 12 dec. 2015. 246 p. Notas de Aula.

BS EN 772-1: Methods of tes for masonry units Part 1: Determination of compressive strength. 2001.

FIQUEROLA, V. Alvenaria de solo-cimento. Revista Técnica. Edição 85. Abril/2004. Disponível em: < <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/85/artigo286284-1.aspx>> Acesso em 6 de julho de 2018.

GUIMARÃES, Gustavo Vaz de Mello. Aula 6 de Mecânica dos Solos. 2016. 54 slides.

GOMES, N. S. A resistência das paredes de alvenaria. EPUSP. São Paulo, 1983.

GRANDE, F. M. Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa. 2003. Universidade de São Paulo

LIMA, R. J. C. G., PARAÍBA BRASIL: UNIVERSIDADE. Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito. 2010.

LIMA, R. J. C. G., PARAÍBA BRASIL: UNIVERSIDADE. Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito. 2010.

Máquinas. Disponível em <<http://vimaqpressas.com.br>> Acesso em 10 de junho de 2018

MENOSSEI, R. T. Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto. 2004.

METSO Mineração. Britador de eixo vertical VSI Barmac® Série B™. Disponível em <<https://www.metso.com/br/produtos/britador-de-impacto/britador-eixo-vertical-vsi-barmac-serie-b/>>. Acesso em 26 de setembro de 2018.

NASCIMENTO, Á. M. et al. Tijolo modular de solo-cimento como material na construção. v. 6, n. 1, p. 187-202, 2018. ISSN 2317-7217.

NYGAARD, Manuela. "Construções diferentes - Taipa"; Manuela Nygaard. Disponível em <http://manuelanygaard.blogspot.com/2011/05/construcoes-diferentes-taipa.html>. Acesso em 18 de setembro de 2018.

PENA, Rodolfo F. Alves. "Solo"; Brasil Escola. Disponível em <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/o-solo.htm>. Acesso em 10 de junho de 2018.

PENTEADO, P. T.; MARINHO, R. C. Análise comparativa de custo e produtividade dos sistemas construtivos: alvenaria de solo-cimento, alvenaria com blocos cerâmicos e alvenaria estrutural com blocos de concreto na construção de uma residência popular. 2011. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PINTO, C. D. S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PIRES, I. A utilização do tijolo ecológico como solução para construção de habitações populares. Monografia). Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Salvador, 2004.

SENÇO, W. D. Manual técnico de pavimentação: volume 1: São Paulo: Pini 2007.

SOUZA, M. I.; SEGANTINI, A. A.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, p. 205-212, 2008. ISSN 1415-4366.

VALENCIANO, M. D. C.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Engenharia Agrícola, 2004. ISSN 0100-6916.

## Apêndice 1

Resultado do peneiramento para solo 1 sem defloculante:

Abertura da Peneira (mm)	Material Retido (g)	Retido Acumulado (g)	Percentual acumulado	Percentual Passa acumulado
4,80	2,15	2,15	2,0%	98,0%
2,00	10,08	12,23	11,5%	88,5%
1,18	15,43	27,66	26,0%	74,0%
0,60	25,58	53,24	50,1%	49,9%
0,42	9,08	62,32	58,6%	41,4%
0,30	12,54	74,86	70,4%	29,6%
0,15	12,05	86,91	81,8%	18,2%
0,075	12,18	99,09	93,2%	6,8%
Fundo	7,19	106,28	100,0%	0,0%
Total	106,28			

Resultado do peneiramento para solo 2 sem defloculante:

Abertura da Peneira (mm)	Material Retido (g)	Retido Acumulado (g)	Percentual acumulado	Percentual Passa acumulado
4,80	0,00	0	0,0%	100,0%
2,00	0,49	0,49	0,5%	99,5%
1,20	13,25	13,74	13,3%	86,7%
0,60	33,05	46,79	45,4%	54,6%
0,42	13,48	60,27	58,5%	41,5%
0,30	14,75	75,02	72,8%	27,2%
0,15	17,69	92,71	90,0%	10,0%
0,075	7,08	99,79	96,9%	3,1%
Fundo	3,19	102,98	100,0%	0,0%
Total	102,98			

Resultado da sedimentação do solo 1 com defloculante:

Leituras Iniciais					
Densidade da Água (g/ml)	0,9945				
Temperatura	25 °C				
Quantidade de Solo (g)	70				
Tempo	L - Densidade (g/ml)	Altura de queda (cm)	L-L <sub>d</sub>	Q <sub>s</sub> (%)	d <sub>médio</sub> (mm)
15	1,045	17,86	0,042	95,28	0,1079
30	1,0448	17,90	0,042	94,83	0,0764
45	1,0448	17,90	0,042	94,83	0,0624
60	1,0445	17,96	0,042	94,16	0,0541
90	1,0445	17,96	0,042	94,16	0,0442
120	1,0445	17,96	0,042	94,16	0,0383
180	1,044	18,05	0,041	93,04	0,0313
240	1,0438	18,09	0,041	92,59	0,0272
360	1,0432	18,20	0,041	91,24	0,0222
480	1,043	18,24	0,040	90,79	0,0193
540	1,0428	18,27	0,040	90,34	0,0182
600	1,0428	18,27	0,040	90,34	0,0173
720	1,0425	18,33	0,040	89,67	0,0158
900	1,0422	18,39	0,040	88,99	0,0141
1080	1,042	18,42	0,039	88,54	0,0129
1500	1,0412	18,57	0,039	86,74	0,0110
1800	1,0405	18,70	0,038	85,17	0,0101
2700	1,039	18,98	0,036	81,80	0,0083
3000	1,038	19,17	0,035	79,55	0,0079
3600	1,0362	19,51	0,034	75,51	0,0073
5400	1,0308	20,52	0,028	63,37	0,0061
7800	1,021	22,35	0,018	41,35	0,0053
9000	1,0172	23,06	0,015	32,81	0,0050
10800	1,0142	23,62	0,012	26,07	0,0046
12600	1,0132	23,80	0,011	23,82	0,0043
14400	1,013	23,84	0,010	23,37	0,0040
16200	1,0125	23,93	0,010	22,25	0,0038
18840	1,012	24,03	0,009	21,12	0,0035
19800	1,011	24,22	0,008	18,88	0,0035
21600	1,011	24,22	0,008	18,88	0,0033
23400	1,011	24,22	0,008	18,88	0,0032

Resultado da sedimentação do solo 2 com defloculante:

Leituras Iniciais					
Densidade da Água (g/ml)	0,9945				
Temperatura	25 °C				
Quantidade de Solo (g)	70				
Tempo	L - Densidade (g/ml)	Altura de queda (cm)	L-L <sub>d</sub>	Q <sub>s</sub> (%)	d <sub>médio</sub> (mm)
15	1,017	23,09	0,014	32,46	0,1232
30	1,0178	22,94	0,015	34,26	0,0869
45	1,0172	23,06	0,015	32,91	0,0711
60	1,017	23,09	0,014	32,46	0,0616
90	1,0168	23,13	0,014	32,01	0,0503
120	1,0168	23,13	0,014	32,01	0,0436
180	1,016	23,28	0,013	30,21	0,0357
240	1,0152	23,43	0,013	28,40	0,0310
300	1,015	23,47	0,012	27,95	0,0278
360	1,0415	18,52	0,039	87,69	0,0225
420	1,014	23,65	0,011	25,70	0,0236
480	1,014	23,65	0,011	25,70	0,0220
540	1,0138	23,69	0,011	25,25	0,0208
600	1,0135	23,75	0,011	24,57	0,0198
720	1,0132	23,80	0,011	23,89	0,0181
900	1,013	23,84	0,010	23,44	0,0162
1080	1,0122	23,99	0,010	21,64	0,0148
1500	1,012	24,03	0,009	21,19	0,0126
1800	1,0115	24,12	0,009	20,06	0,0115
2700	1,011	24,22	0,008	18,94	0,0094
3600	1,0102	24,36	0,008	17,13	0,0082
5580	1,01	24,40	0,007	16,68	0,0066
7920	1,0095	24,50	0,007	15,55	0,0055
9000	1,0092	24,55	0,007	14,88	0,0052
11280	1,0092	24,55	0,007	14,88	0,0046
12600	1,009	24,59	0,006	14,43	0,0044
14400	1,009	24,59	0,006	14,43	0,0041
16200	1,0085	24,68	0,006	13,30	0,0039

## Apêndice 2

Ensaio para determinação do limite de liquidez para solo 1:

29 GOLPES	Nº Cápsula			
	I	II	III	IV
Tara 1 (g)	6,820	6,730	6,780	6,400
Tara 1 + Solo Úmido (g)	8,860	8,530	8,360	8,860
Solo Úmido (g)	2,040	1,800	1,580	2,460
Tara 2 (g)	6,835	6,765	6,838	6,412
Tara 2 + Solo Seco (g)	8,251	8,032	7,821	8,149
Solo seco (g)	1,416	1,267	0,983	1,737
Água (g)	0,624	0,533	0,597	0,723
Umidade (%)	44,07	42,07	60,73	41,62
Valor Médio de Umidade (%)	42,59			

25 GOLPES	Nº Cápsula		
	5	6	7
Tara 1 (g)	14,500	14,590	14,990
Tara 1 + Solo Úmido (g)	16,840	16,790	17,850
Solo Úmido (g)	2,340	2,200	2,860
Tara 2 (g)	14,405	14,600	15,050
Tara 2 + Solo Seco (g)	16,135	16,140	16,941
Solo seco (g)	1,730	1,540	1,891
Água (g)	0,610	0,660	0,969
Umidade (%)	35,26	42,86	51,24
Valor Médio de Umidade (%)	43,12		

42 GOLPES	Nº Cápsula		
	8	A	B
Tara 1 (g)	14,250	7,620	7,600
Tara 1 + Solo Úmido (g)	16,730	9,860	10,930
Solo Úmido (g)	2,480	2,240	3,330
Tara 2 (g)	14,129	7,549	7,517
Tara 2 + Solo Seco (g)	15,960	9,180	9,932
Solo seco (g)	1,831	1,631	2,415
Água (g)	0,649	0,609	0,915
Umidade (%)	35,445	37,339	37,888
Valor Médio de Umidade (%)	36,89		

<b>17</b> <b>GOLPES</b>	N° Cápsula		
	C	D	E
Tara 1 (g)	7,610	7,600	8,040
Tara 1 + Solo Úmido (g)	10,750	11,270	10,450
Solo Úmido (g)	3,140	3,670	2,410
Tara 2 (g)	7,605	7,620	7,990
Tara 2 + Solo Seco (g)	8,879	10,000	9,599
Solo seco (g)	1,274	2,380	1,609
Água (g)	1,866	1,290	0,801
Umidade (%)	146,468	54,202	49,782
Valor Médio de Umidade (%)	51,99		

Ensaio para determinação do limite de liquidez para solo 2:

<b>34</b> <b>GOLPES</b>	N° Cápsula		
	5	6	7
Tara (g)	14,405	14,600	15,050
Tara + Solo Úmido (g)	16,078	16,774	17,145
Solo Úmido (g)	1,673	2,174	2,095
Tara + Solo Seco (g)	15,673	16,219	16,582
Solo seco (g)	1,268	1,619	1,532
Água (g)	0,405	0,555	0,563
Umidade (%)	31,94	34,28	36,75
Valor Médio de Umidade (%)	34,32		

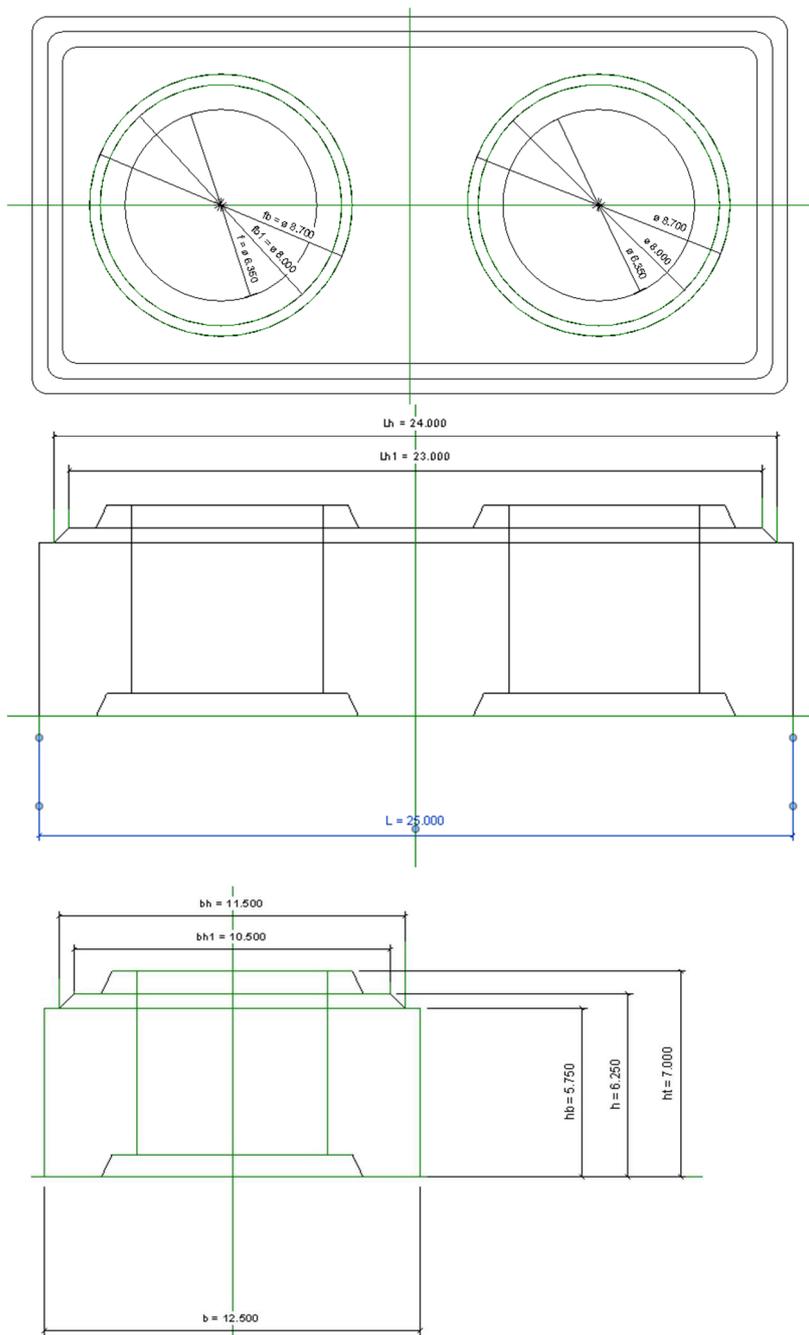
<b>56</b> <b>GOLPES</b>	N° Cápsula		
	1	2	3
Tara (g)	15,521	14,315	13,572
Tara + Solo Úmido (g)	17,146	16,471	16,485
Solo Úmido (g)	1,625	2,156	2,913
Tara + Solo Seco (g)	16,738	15,967	15,826
Solo seco (g)	1,217	1,652	2,254
Água (g)	0,408	0,504	0,659
Umidade (%)	33,53	30,51	29,24
Valor Médio de Umidade (%)	31,09		

<b>18</b> <b>GOLPES</b>	N° Cápsula		
	8	A	B
Tara (g)	14,129	7,549	7,517
Tara + Solo Úmido (g)	18,321	9,585	9,562
Solo Úmido (g)	4,192	2,036	2,045
Tara + Solo Seco (g)	17,067	9,031	8,950
Solo seco (g)	2,938	1,482	1,433
Água (g)	1,254	0,554	0,612
Umidade (%)	42,682	37,382	42,708
Valor Médio de Umidade (%)	40,92		

<b>13 GOLPES</b>	N° Cápsula		
	I	II	III
Tara (g)	6,835	6,765	6,838
Tara + Solo Úmido (g)	10,391	10,500	9,735
Solo Úmido (g)	3,556	3,735	2,897
Tara + Solo Seco (g)	9,971	9,288	8,806
Solo seco (g)	3,136	2,523	1,968
Água (g)	0,420	1,212	0,929
Umidade (%)	13,393	48,038	47,205
Valor Médio de Umidade (%)	47,622		

### Apêndice 3

Medidas - Tijolos														
Tijolo	Solo	Traço	b	bh	bh1	hb	h	ht	L	Lh	Lh1	f	fb	fb1
13	S1S2	1:8	12,59	11,42	10,70	5,72	6,29	7,00	25,06	23,98	23,22	6,48	8,81	7,94
			12,57	11,53	10,72	5,68	6,26	7,14	25,05	23,79	23,19	6,45	8,87	7,85
			12,57	11,41	10,53	5,66	6,31	7,08	25,05	23,92	23,19	6,46	8,76	7,74
MÉDIA			<b>12,58</b>	<b>11,45</b>	<b>10,65</b>	<b>5,69</b>	<b>6,29</b>	<b>7,07</b>	<b>25,05</b>	<b>23,90</b>	<b>23,20</b>	<b>6,46</b>	<b>8,81</b>	<b>7,84</b>
29/11	S1S2	1:10	12,56	11,50	10,78	5,45	6,27	6,98	25,02	23,91	23,22	6,47	8,74	7,71
			12,55	11,49	10,71	5,79	6,26	6,92	25,02	23,91	23,16	6,44	8,85	7,76
			12,55	11,53	10,65	5,69	6,03	6,97	25,03	23,95	23,04	6,44	8,78	7,83
MÉDIA			<b>12,55</b>	<b>11,51</b>	<b>10,71</b>	<b>5,64</b>	<b>6,19</b>	<b>6,96</b>	<b>25,02</b>	<b>23,92</b>	<b>23,14</b>	<b>6,45</b>	<b>8,79</b>	<b>7,77</b>



## Apêndice 4

Ensaio de compressão simples														
Tipo de tijolo	Tipo de teste	CP1 (ton)	CP2 (ton)	CP3 (ton)	CP4 (ton)	CP5 (ton)	QT	Área (cm <sup>2</sup> )	RC1 (MPa)	RC2 (MPa)	RC3 (MPa)	RC4 (MPa)	RC5 (MPa)	RC (Mpa)
Solo-cimento 1:8	Inteiro, colado e imergido	1,40	1,62				2	252,01	0,56	0,64				0,60
Solo-cimento 1:8	inteiro, colado e seco	2,53	2,06	1,78	2,95	1,90	5	252,01	1,00	0,82	0,71	1,17	0,75	0,89
Solo-cimento 1:8	cortado, colado e imergido	0,71	0,53	0,68			3	122,32	0,58	0,43	0,56			0,52
Solo-cimento 1:8	cortado colado	1,53	1,49	1,53			3	122,32	1,25	1,22	1,25			1,24
Solo-cimento 1:8	Inteiro	7,45	3,92	5,14	3,92	4,53	5	252,01	2,96	1,56	2,04	1,56	1,80	1,98
+Pó de brita 1:6:0,5	inteiro, colado e seco	3,96	3,74				2	252,01	1,57	1,48				1,53
+Pó de brita 1:6:0,5	cortado, colado e seco	2,17	1,84	2,14			3	122,32	1,77	1,50	1,75			1,68
+Pó de brita 1:6:0,5	cortado, colado e imergido	1,42	2,38	1,71			3	122,32	1,16	1,94	1,40			1,50
+Pó de brita 1:8:1	inteiro colado, imergido	1,82					1	252,01	0,72					0,72
+Pó de brita 1:8:1	inteiro, colado e seco	2,39					1	252,01	0,95					0,95
+Pó de brita 1:8:1	cortado, colado e imergido	1,04	0,76	0,97			3	122,32	0,85	0,62	0,79			0,75
+Pó de brita 1:8:1	cortado colado	1,93	1,50	1,48			3	122,32	1,58	1,23	1,21			1,34
Solo-cimento 1:6	inteiro colado, imergido	3,12	3,79	3,41			3	252,01	1,24	1,50	1,35			1,37
Solo-cimento 1:6	inteiro, colado e seco	4,73	7,34	6,88			3	252,01	1,88	2,91	2,73			2,51
Solo-cimento 1:6	cortado, colado e imergido	1,70	1,36	1,89			3	122,32	1,39	1,11	1,55			1,35
Solo-cimento 1:6	cortado colado	2,84	1,94	2,61			3	122,32	2,32	1,59	2,13			2,01

CP=Corpo de prova; QT = Quantidade; RC = Resistência à compressão