INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CAMPUS SÃO MATEUS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JORDAN CUNHA MARCHIORI

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO PRENSADOS COM A INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

SÃO MATEUS-ES
2020

JORDAN CUNHA MARCHIORI

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO PRENSADOS COM A INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

Monografia apresentada à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Antônio Carlos Barbosa Zancanella.

SÃO MATEUS-ES

2020

Dados internacionais de catalogação na publicação (CIP)
Bibliotecária responsável Sheila Guimarães Martins CRB6-ES 671

M357a Marchiori, Jordan Cunha, 1993-

Análise das propriedades físicas e mecânicas de tijolos Solo-cimento prensados com a incorporação de materiais Alternativos/ Jordan Cunha Marchiori.-- 2020.

120 f. : il. ; 30 cm.

Orientador : Antônio Carlos Barbosa Zancanella.

Monografia (graduação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, Coordenadoria de Curso Superior de Engenharia Mecânica, 2020.

1. Construção civil - Reciclagem. 2. Sustentabilidade e meio ambiente. I. Zancanella, Antônio Carlos Barbosa. II. Instituto Federal do Espírito Santo. Campus São Mateus. III. Título.

CDD 22 – 690

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CAMPUS SÃO MATEUS

Rodovia BR 101-Norte – Km 58 – Bairro Litorâneo – 29932-540 – São Mateus – ES
27 3771-1262
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JORDAN CUNHA MARCHIORI

TÍTULO DO TRABALHO ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO PRENSADOS COM A INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovado em 07 de Outubro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Antônio Carlos Barbosa Zancanella
Instituto Federal do Espirito Santo
Orientador

Prof. M.Sc. Rômulo Maziero
Universidade Federal de Minas Gerais
Co-Orientador

Prof. M.Sc. Bruno Corveto Bragança
Instituto Federal do Espirito Santo

Prof. (a) M.Sc. Renata Trevelin da Silva Stange
Instituto Federal do Espirito Santo

AGRADECIMENTOS

Nesse momento tão importante para mim, agradeço à Deus por abençoar à minha trajetória acadêmica e por tudo o que tem feito em minha vida.

Em especial, quero agradecer aos meus pais, Jocival e Luzia, por sempre me apoiarem nos momentos difíceis, principalmente me proporcionando estrutura financeira e psicológica para que eu pudesse encerrar este ciclo acadêmico. Dedico este trabalho ao meu pai, que infelizmente não conseguiu presenciar esse momento. No entanto, tenho certeza que ele está muito feliz e orgulhoso por mim aonde quer que esteja. Dedico esta monografia a ele, pois sempre foi um grande incentivador para que este momento finalmente chegasse.

Quero agradecer especialmente ao professor Rômulo Maziero por sempre me auxiliar nas minhas pesquisas do IFES – Campus São Mateus. Mesmo não compondo o quadro de funcionários da instituição, sempre foi muito solicito e atencioso com às minhas demandas. Deixo aqui o meu agradecimento por todo tempo disponibilizado e pelo apoio. Além disso, agradeço ao meu orientador e professor Antônio Carlos Barbosa Zancanella por acreditar no meu trabalho e nunca desistir de mim nos momentos difíceis da minha vida. Sempre acreditou no meu potencial e devo muita gratidão por tudo o que fez por mim.

Finalizo os meus agradecimentos pelo apoio pelo colaborador do instituto, o vigilante Paulo. A monografia surgiu a partir de uma demanda necessitada por ele e por me ajudar na fabricação dos corpos de prova. Agradeço ao Paulo pela disponibilidade e paciência durante todo o processo de fabricação.

RESUMO

Uma crescente demanda por recursos naturais e os elevados índices de poluição têm pressionado o setor da construção civil no desenvolvimento e uso de recursos sustentáveis. Como alternativa ao setor, os tijolos solo-cimento têm se mostrado promissor na redução dos impactos ambientais no processo produtivo impulsionados pelo ramo. Nesta vertente, este trabalho teve por objetivo confeccionar tijolos vazados de solo-cimento com incorporação de materiais alternativos, como cal, pó de rocha e resíduo de mármore, avaliando as propriedades físicas e mecânicas desses produtos. Para tal, foram realizados ensaios granulométricos e limites de consistência nas amostras contendo solo e solo com adição de cal, pó de rocha e resíduo de mármore, além do ensaio de massa específica para a amostra de solo. Em adição, foram preparados tijolos contendo as composições citadas anteriormente adicionando 12,5% de cimento. Após o processo de prensagem manual e cura por 28 dias, as amostras foram submetidas aos ensaios de análise dimensional, resistência à compressão simples e absorção de água. Os resultados indicaram que as adições de pó de rocha e resíduo de mármore reduziram os índices de plasticidade do solo, além de promover melhores propriedades mecânicas como redução da absorção de água e aumento da resistência à compressão simples, conforme a ABNT NBR 8491:2012. No entanto, a adição de cal no tijolo solo-cimento aumentou a porosidade do produto, não atendendo a norma citada. Apesar de atender aos requisitos da norma, os resultados indicaram propriedades mecânicas inferiores a amostra de solo, não apresentando benefícios em sua incorporação ao tijolo.

Palavras-chave: Solo-cimento. Resíduo de mármore. Pó de rocha. Cal. Sustentabilidade.

ABSTRACT

A growing demand for natural resources and the high levels of pollution subject to have been pressing the civil construction industry to the development and use of sustainable resources. As an alternative to the industry, soil-cement bricks have shown promise in reducing environmental impacts in the production process driven by the industry. In this aspect, this work aimed to manufacture hollow bricks of soil-cement with incorporation of alternative materials, such as lime, rock powder and marble residue, evaluating the physical and mechanical properties of these products. For this, granulometric tests and consistency limits were performed on the samples including soil and soil with the addition of lime, rock powder and marble residue, in addition to specific mass testing for a soil sample. Moreover, bricks were prepared as compositions mentioned above by adding 12.5% cement. After the process of manual pressing and curing for 28 days, the samples were subjected to dimensional tests, resistance to simple compression and water absorption. The results indicated that the addition of rock powder and marble residue reduced the plasticity indexes of the soil, in addition to promoting better mechanical properties such as reducing water absorption and increasing resistance to simple compression, according to ABNT NBR 8491: 2012. However, an addition of lime in the soil-cement brick increased the product's porosity, not meeting as mentioned standard. Despite meeting the requirements of the standard, the results indicate mechanical properties less than to the soil sample, does not present benefits in its incorporation to the brick.

Keywords: Soil-cement. Marble residue. Rock powder. Lime. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Torre de Jericó 19
Figura 2 – Pirâmides de Queóps, Quéfren e Miquerinos, no Egito 19
Figura 3 – Perfil de solo a partir de camadas existentes 30
Figura 4 – Definição da textura da partícula em função do diâmetro 31
Figura 5 – Ensaio de sedimentação do solo 36
Figura 6 – Ensaio de peneiramento do solo por agitação mecânica 37
Figura 7 – Gráfico da curva granulométrica 40
Figura 8 – Estado do solo em função ao teor de umidade 40
Figura 9 – Ensaio de limite de liquidez 42
Figura 10 – Ensaio de limite de plasticidade 42
Figura 11 – Curva de compactação 47
Figura 12 – Prensa manual para fabricação de tijolo solo-cimento 48
Figura 13 – Prensa hidráulica para fabricação de tijolo solo-cimento 49
Figura 14 – Tijolo maciço de solo-cimento 50
Figura 15 – Tijolo vazado de solo-cimento 51
Figura 16 – Corte perpendicular dos corpos de prova 53
Figura 17 – Máquina de ensaio à compressão simples 53
Figura 18 – Produção nacional de rocha britada em 2015 59
Figura 19 – Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova 62
Figura 20 – Solo utilizado no experimento 63
Figura 21 – Pasta formada pela combinação entre solo e água destilada 68
Figura 22 – Amostra sendo preparada para o ensaio de limite de liquidez 69
Figura 23 – Ensaio de plasticidade do solo 70
Figura 24 – Mistura sendo homogeneizada e hidratada durante o preparo 72
Figura 25 – Verificação de consistência da mistura 73
Figura 26 – Prensa manual 74
Figura 27 – Dimensões do tijolo solo-cimento a ser fabricado 74
Figura 28 – Amostra adicionada ao molde 75
Figura 29 – Tijolos posicionados sobre palete de madeira após fabricação 75
Figura 30 – Hidratação dos tijolos após a fabricação 76
Figura 31 – Corte dos tijolos 78
Figura 32 – Tijolo cortado com serra diamantada 78

Figura 33 – Preparação do experimento para receber a camada de argamassa 79
Figura 34 – Tijolos sendo capeados por argamassa 80
Figura 35 – Amostras com faces planas com uso de argamassa 80
Figura 36 – Corpos de prova imersos em água 81
Figura 37 – Máquina de ensaio universal configurada para o ensaio de compressão 82
Figura 38 – Corpo de prova após ruptura 83
Figura 39 – Amostras submetidas à secagem para o ensaio de absorção de água 84
Figura 40 – Pesagem da amostra 84
Figura 41 – Curva granulométrica das amostras de MS, MC, MB e MM 91
Figura 42 – Limite de liquidez equivalente à 25 golpes para MS 94
Figura 43 – Limite de liquidez equivalente à 25 golpes para MB 94
Figura 44 – Limite de liquidez equivalente à 25 golpes para MM 95
Figura 45 – Corpo de prova rompido após ensaio de resistência à compressão simples 100
Figura 46 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples de MS 101
Figura 47 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples de MC 102
Figura 48 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples de MB 103
Figura 49 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples para MM 104
Figura 50 – Valores médios para resistência à compressão simples para amostras MS, MC, MB e MM 105
Figura 51 – Valores individuais para ensaio de absorção de água para amostras MS, MC, MB e MM 107
Figura 52 – Valores médios para ensaio de absorção de água para amostras MS, MC, MB e MM 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química para caracterização de cimento Portland 23
Tabela 2 – Classificação do calcário pelo teor de MgO. 24
Tabela 3 – Tipos de cimentos e suas respectivas adições 28
Tabela 4 – Definição do grupamento textural 31
Tabela 5 – Tipos de tijolos e suas respectivas características 33
Tabela 6 – Valores de IP e LL para diferentes tipos de solo 43
Tabela 7 – Tipos de tijolos solo-cimento e suas respectivas dimensões 51
Tabela 8 – Produção mundial de cal em 2019 57
Tabela 9 – Relação de tipos de britas e suas respectivas dimensões 58
Tabela 10 – Amostras e suas respectivas composições 72
Tabela 11 – Relação da quantidade de corpos de prova para cada ensaio 77
Tabela 12 – Determinação do teor de umidade da amostra MS 87
Tabela 13 – Determinação da massa específica de MS 87
Tabela 14 – Peneiramento da amostra de MS 88
Tabela 15 – Peneiramento da amostra de MC 89
Tabela 16 – Peneiramento da amostra de MB 89
Tabela 17 – Peneiramento da amostra de MM 90
Tabela 18 – Classificação granulométrica 91
Tabela 19 – Ensaio de limite de liquidez para amostra MS 92
Tabela 20 – Ensaio de limite de liquidez para amostra MB 93
Tabela 21 – Ensaio de limite de liquidez para amostra MM 93
Tabela 22 – Ensaio de limite de plasticidade para amostra MS 95
Tabela 23 – Ensaio de limite de plasticidade para amostra MB 96
Tabela 24 – Ensaio de limite de plasticidade para amostra MM 96
Tabela 25 – Limites de liquidez e plasticidade para cada amostra 96
Tabela 26 – Análise dimensional dos corpos de prova de MS 98
Tabela 27 – Análise dimensional dos corpos de prova de MC 98
Tabela 28 – Análise dimensional dos corpos de prova de MB 99
Tabela 29 – Análise dimensional dos corpos de prova de MM 99
Tabela 30 – Ensaio de resistência à compressão simples para MS 101
Tabela 31 – Ensaio de resistência à compressão simples para MC 102
Tabela 32 – Ensaio de resistência à compressão simples para MB 103

Tabela 33 – Ensaio de resistência à compressão simples para MM 104
Tabela 34 – Ensaio de absorção de água para MS 106
Tabela 35 – Ensaio de absorção de água para MC 106
Tabela 36 – Ensaio de absorção de água para MB 106
Tabela 37 – Ensaio de absorção de água para MM 107

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS

CH - Cal hidratada

CP - Cimento Portland

IP - Índice de plasticidade

LL - Limite de liquidez

LP - Limite de plasticidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 JUSTIFICATIVA 17
1.2 OBJETIVOS 18
1.2.1 Objetivo geral 18
1.2.2 Objetivos específicos 18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 A ALVENARIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL 19
2.2 CIMENTO PORTLAND 21
2.2.1 Características do cimento Portland 22
2.2.1.1 Clínquer 23
2.2.1.2 Adições 23
2.2.1.2.1 Material carbonático 24
2.2.1.2.2 Gesso 24
2.2.1.2.3 Escória de alto forno 25
2.2.1.2.4 Material pozolânico 25
2.2.2 Classes e composições químicas de cimentos Portland 26
2.2.3 Produção brasileira de cimento Portland 28
2.3 TIJOLO SOLO-CIMENTO 29
2.3.1 Solo 29
2.3.2 Tipos de tijolos 32
2.3.3 Vantagens e limitações 33
3.3.4 Normatização e ensaios 34
2.3.4.1 Granulometria do solo 35
2.3.4.2 Limites de Atterberg 40
2.3.4.3 Massa específica e massa específica aparente 43
2.3.4.4 Compactação do solo 46
2.3.4.5 Prensagem manual ou hidráulica 47
2.3.4.6 Cura 49
2.3.4.7 Análise dimensional 50
2.3.4.8 Resistência à compressão simples 52
2.3.4.9 Absorção de água 54
2.4 O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS 55
2.4.1 Cal hidratada 55
2.4.2 Pó de rocha 57
2.4.3 Resíduo de mármore 59
3 MATERIAIS E MÉTODOS 61

3.1 MATERIAIS 63
3.1.1 Solo 63
3.1.2 Cimento 63
3.1.3 Água 64
3.1.4 Cal hidratada 64
3.1.5 Pó de rocha 64
3.1.6 Resíduo de mármore 65
3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO 65
3.2.1 Caracterização física do solo 65
3.2.1.1 Análise granulométrica 66
3.2.1.2 Massa específica do solo 67
3.2.1.3 Determinação do limite de liquidez e plasticidade do solo 67
3.2.2 Dosagem das misturas 70
3.2.3 Fabricação dos tijolos 72
3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES 77
3.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA 83
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 86
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS 86
4.1.1 Massa específica 87
4.1.2 Ensaio granulométrico 88
4.1.3 Ensaio de limite de consistência 92
4.1.4 Ensaio de resistência à compressão simples 97
4.1.5 Absorção de água 106
5 CONCLUSÃO 110
REFERÊNCIAS 113

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem desempenhado um importante papel econômico e social, sendo um dos principais setores da economia brasileira. No entanto, o setor vem ocasionando um grande impacto e degradação do meio ambiente durante todas as etapas da cadeia produtiva, principalmente na extração de matérias primas e a geração de resíduos sólidos. Estima-se que o ramo consome cerca de 40% do total de recursos naturais extraídos pela sociedade (NENO; BRITO; VEIGA, 2014).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2017), a construção e edificações representam 39% das emissões de gás carbônico ligados à produção e consumo de energia. Em adição, o segmento tem a missão de reduzir em 30% o consumo energético até 2030, como meta firmada no Acordo de Paris (COP21).

O setor da construção necessita aprimorar a sustentabilidade na cadeia produtiva, principalmente para garantir proteção de recursos naturais para as próximas gerações. Para isso, deve-se empregar técnicas alternativas à fim de garantir um desenvolvimento sustentável em seus processos de produção, como exemplo o uso de tecnologias limpas, energias renováveis e métodos de proteção ambiental (BATISTA JUNIOR; ROMANEL, 2013).

O uso do solo-cimento é considerado como um material alternativo para atingir os objetivos sustentáveis de novas tecnologias implementadas em edificações. O produto é formado em maior proporção por solo, seguido de uma parcela de cimento e água. O principal destaque dessa tecnologia é a dispensa de queima, como aplicada na fabricação da cerâmica vermelha, e a abundância do solo como matéria-prima principal. O solo-cimento pode ser aplicado na fabricação de blocos e tijolos, sendo produzidos exclusivamente a partir da prensagem, podendo ser manual ou hidráulica, e cura do produto, recebendo a denominação de tijolos ecológicos (CASTRO *et al.*, 2016).

Segundo Segantini e Wada (2011), esta tecnologia pode reduzir entre 30 a 40% do custo total de obra, além de apresentar oportunidades para incorporação de materiais alternativos em sua composição, como resíduos minerais, industriais e agrícolas. Como complemento, Castro *et al.* (2016) afirma que a eliminação de argamassa de assentamento e revestimento, devido ao uso de cola branca, aliada à qualidade final e acabamento do produto, oferecem redução considerada no custo de edificações.

No entanto, Fraga *et al.* (2016) salientam que a escolha do solo a ser usado requer atenção, pois solos com baixos percentuais de areia na composição não são aconselháveis para utilização devido uma maior necessidade no consumo de cimento para estabilização do solo. Os autores ainda recomendam o uso de solos que possuem em torno de 50 a 70% de areia em sua composição, apresentando característica arenosa, havendo um menor percentual de argila para garantir coesão entre os grãos. No entanto, é relevante à incorporação de argila para viabilizar coesão entre os grãos.

Os solos argilosos não são recomendados pelo maior gasto com cimento, além da estabilização e pulverização apresentarem maiores dificuldades devido a uma baixa quantidade de areia em sua formação. Para esse caso, é necessário aplicar uma correção no solo, por meio da adição de areia ou resíduos. No entanto, a aplicação de areia possui limitações técnicas e econômicas (KOLLING; TROGELLO; MODOLO, 2012).

Um material alternativo a ser incorporado no solo-cimento é o resíduo de mármore, principalmente pelo impacto ambiental em seu descarte irregular. Durante o corte de rochas de mármore, é liberado uma quantidade expressiva de pó, o qual pode causar doenças respiratórias como a silicose. Para minimizar o impacto, é bombeada uma mistura composta por granalha de aço, cal e água sobre o contato da lâmina de corte e a rocha. O atrito entre lâmina e rocha, causa uma redução no tamanho da granalha, o que reduz a capacidade abrasiva. A mistura é então dejetada compondo um resíduo constituído por pó de rocha, cal e finos metálicos provenientes do desgaste das lâminas e da granalha (RAYMUNDO *et al.*, 2012).

Ademais, a lama abrasiva gerada ocasiona diversos impactos ambientais, como a contaminação dos recursos hídricos e solo. Após o processo de serragem dos blocos de rochas ornamentais, a lama produzida é descartada em lagoas de secagem, sendo muitas vezes locais não licenciados e nem preparados de acordo com as diretrizes de órgãos ambientais. Uma alternativa para diminuir o acúmulo do pó de mármore é a utilização na produção de alvenarias, como argamassas, cerâmica vermelha, entre outros (ALVES *et al.*, 2015).

No entanto, uma variabilidade na composição química de resíduos de rochas ornamentais pode afetar às propriedades mecânicas do produto. Como alternativas, outros materiais podem ser utilizados para correção do solo, alinhando boas propriedades químicas e físicas, e disponibilidade no mercado local. O pó de rocha é largamente utilizado na fabricação de concreto e blocos de concreto como material de enchimento, garantindo uma maior resistência mecânica do composto produzido. Além deste material, a cal hidratada é aplicada na correção de solos usados para pavimentação, principalmente pela característica aglomerante e menor custo se comparado ao cimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

O resíduo de mármore, pó de rocha e cal hidratada podem oferecer oportunidades promissoras para correção de propriedades físicas e químicas de diferentes tipos de solo. Considerando uma viabilidade tanto econômica como ecológica, os tijolos solo-cimento têm se mostrado um produto interessante para redução de impactos ambientais e econômicos na construção civil. Ao agregar materiais alternativos em seu processo, pode-se corrigir à composição química de solos, além de oferecer melhorias nas características físicas e mecânicas do produto. Alinhando a isso, o estudo se justifica pela proposta de uma melhor destinação ao resíduo de mármore, uma vez que o mesmo possui dificuldade de degradação no meio ambiente, disposição, transporte, logística e promove impactos à saúde humana.

A partir disso, é possível fabricar tijolos ecológicos que apresentam importante aplicação na construção civil e diminuição significativa dos danos ambientes

gerados pelo modelo atual da cadeia produtiva do segmento. Nessa vertente, os principais aspectos que influenciaram os objetos de estudos são a aplicação direta em edificações, impulsionados por materiais com melhores propriedades mecânicas de baixo custo e sobre uma possível diminuição do impacto ambiental que o setor gera, além de promover um possível destino ao resíduo de mármore. Portanto, a elaboração do objeto de estudo se torna importante para o desenvolvimento promissor de tijolos ecológicos, possivelmente a criação de redes simbióticas de cooperação entre empresas, permitindo uma diminuição do consumo de materiais e energia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Investigar as propriedades físico-mecânicas de tijolos solo-cimento preparados a partir do solo coletado na cidade de Linhares, Espírito Santo, e agregar materiais alternativos em sua composição para melhorar características físico-químicas do solo, buscando viabilizar o uso em edificações.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o solo e suas respectivas proporções compostas por solo e cal hidratada, solo e resíduo de mármore e solo e pó de rocha quanto a granulometria, limites de liquidez e plasticidade e massa específica, apenas para amostra contento solo;
- Realizar ensaio mecânico de resistência à compressão simples em tijolos solo-cimento;
- Verificar a absorção de água dos corpos de prova confeccionados via prensagem manual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A ALVENARIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A alvenaria representa uma das mais antigas técnicas na construção civil. Embora seja desconhecido o exato período de sua utilização, historiadores sugerem que a alvenaria começou a ser utilizada no Oriente Médio, mais precisamente na Mesopotâmia, por volta de 8000 a 4000 a.C. Segundo pesquisadores, os principais materiais utilizados eram o adobe, barro queimado, argila seca ao sol e os blocos de arenito. A torre de Jericó (Figura 1) é considerada a mais antiga construção urbana na história. Além disso, é possível citar outros exemplos da alvenaria em construções históricas, como as pirâmides de Queóps, Quéfren e Miquerinos (Figura 2), no Egito, as Muralhas da China, dentre outros (MASTER HOUSE, 2020).

Figura 1 – Torre de Jericó.

Fonte: Cafetorah (2016).

Figura 2 – Pirâmides de Queóps, Quéfren e Miquerinos, no Egito.

Fonte: Master House (2020).

A alvenaria pode ser definida como um conjunto de materiais, podendo ser formado por tijolos, blocos, rochas ou peças sobrepostas, ligadas entre si por meio de uma camada de argamassa e podendo ainda, conter armadura envolta em concreto, formando uma estrutura linear e resistência, sendo um elemento vertical e/ou horizontal. Em adição, possui uma função muito importante em construções, uma vez que necessita resistir a esforços de compressão, de forma única ou uma combinação de tensões, resistir impactos, fornece boas propriedades acústicas e térmica, vedação de espaços, dentre outros (PEREIRA, 2019).

A alvenaria é dividida em duas classes: estrutural e de vedação. Segundo Avellar Junior et al. (2018), a alvenaria estrutural é um sistema construtivo que exerce simultaneamente funções estruturais e de vedação da edificação. Este sistema não necessita de uso de vigas e pilares para sustentação de construções, promovendo assim, uma racionalização nos custos de implementação. Além disso, deve-se resistir cargas verticais e horizontais além do seu próprio peso, por exemplo telhados e/ou lajes. Camacho *et al.* (2015) acrescentam que os componentes básicos da alvenaria estrutural são: blocos, argamassa, graute e armadura.

Por outro lado, Sabbatini (1984) afirma que a alvenaria estrutural pode apresentar armadura ou não. O autor complementa que a armadura contém blocos vazados de concreto ou cerâmica, com adição de barras de aços introduzidos nas cavidades dos blocos. A principal característica é a absorção de tensões de flexão e tração de edificações. Em contrapartida, a estrutura sem armadura pode utilizar blocos cerâmicos, concretos ou sílico-calcários, sendo os mesmos perfurados ou maciços. As principais desvantagens da alvenaria estrutural são uma dificuldade em realizar modificações, uma vez que não podem ser removidas sem elementos estruturais adicionais para suprir os esforços aplicados na construção, e limitações estéticas e design devido ao tamanho e formato dos blocos (HOFFMANN *et al.*, 2012).

A alvenaria de vedação tem a função de vedar e separar ambientes externos e internos de edificações, não desempenhando assim, uma função estrutural. Em

adição, esse sistema preenche os vãos de aços, concreto armado e outros tipos de estruturas. Para isso, deve suportar apenas o seu próprio peso e pequenas cargas adicionais, como armários, compartimentos internos, dentre outros. A alvenaria de vedação deve apresentar boas propriedades térmicas e acústicas e resistir às cargas laterais dinâmicas e estáticas, como exemplo pressão dos ventos e infiltração de águas pluviais (THOMAZ *et al.*, 2009).

Segundo Fernandes, Almeida e Andrade Filho (2016), a alvenaria de vedação é uma junção de blocos ou tijolos, sendo esses de concreto ou cerâmicos, unidos por uma camada de argamassa. O sistema apresenta como principais vantagens a alta resistência à pressão dos ventos, umidade e movimentos térmicos, além da facilidade de aplicar instalações hidráulicas e elétricas. Por outro lado, é uma alvenaria muito suscetível à desperdícios de materiais e mão de obras, além de contribuir para um aumento da massa total de edificações.

Os blocos ou tijolos, também conhecidos como unidades, utilizados na alvenaria podem ser confeccionados dos mais diversos materiais, sendo os cerâmicos e de concretos os mais utilizados na construção civil. Para desempenhar uma função desejável, as unidades precisam ter uma adequada resistência à compressão, ter a capacidade de aderência de argamassa para homogeneizar a parede, desempenhar boas propriedades mecânica contra umidade, agentes químicos e movimentos térmicos, dimensões controladas e resistência ao fogo (UETA, 2013).

2.2 CIMENTO PORTLAND

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento Portland, mais conhecido na construção civil como cimento, é composto por pó fino que possui propriedades ligantes, aglutinantes ou aglomerantes, que apresentam a característica de endurecimento com a adição de água. Após o seu completo endurecimento, o cimento Portland não se decompõe, mesmo que com uma nova adição de água.

2.2.1 Características do cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico formado por um pó inorgânico finamente moído, não metálico, obtido a partir da calcinação de rochas naturais que endurece na presença de água (ESPUELAS *et al.*, 2018). O cimento Portland é composto por clínquer e adições, sendo o clínquer o principal componente e presente em todas as classes de cimento. Por outro lado, as adições podem variar de acordo com a classe do cimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

A fabricação do cimento ocorre por meio da calcinação da mistura entre materiais argilosos e calcários submetidos à temperatura de 1450 °C. Os calcários são originados a partir do óxido de cálcio encontrado em rochas calcários e gesso. Por outro lado, as substâncias argilosas são obtidas a partir de silicato e aluminato presentes em argilas, xisto e escórias. A composição química do cimento Portland envolve diferentes óxidos, sendo em sua maior proporção a incorporação de óxidos de cálcio (CaO), dióxido de silício ($\mathrm{SiO_2}$), óxido de alumínio ($\mathrm{Al_2O_3}$) e óxido de ferro ($\mathrm{Fe_2O_3}$). Além disso, são adicionados os óxidos de magnésio (MgO), óxido sulfúrico (SO_3), dentre outros óxidos alcalinos (BEDIAKO; AMANKWAH, 2015).

A Tabela 1 apresenta os principais componentes presentes no cimento Portland.

Tabela 1 – Composição química para caracterização de cimento Portland.

Componente	Mínimo (%)	Média (%)	Máximo (%)
SiO_2	18,40	21,02	24,50
Fe_2O_3	0,16	2,85	5,78
Al_2O_3	3,10	5,04	7,56
CaO	58,10	64,18	68,00
MgO	0,02	1,67	7,10
SO_3	0,00	2,58	5,35
Na_2O	0,00	0,24	0,78
K_2O	0,04	0,70	1,66
Equivalente alcalino	0,03	0,68	1,24
Cal livre	0,03	1,24	3,68

Fonte: Adaptado de Bediako e Amankwah (2015).

2.2.1.1 Clínquer

O clínquer é um material rígido e granular, formado na etapa de sintetização ou clinquerização durante o processo produtivo do cimento. Este material possui formato de pelotas acinzentadas e foscas, possuindo propriedades hidráulicas. Sua composição é formada por silicato tricálcio ($3CaO - SiO_2$), aluminato tricálcio ($3CaO.Al_2O_3$), silicato dicálcio ($2CaO - SiO_2$) e ferro-aluminato-tetracálcio ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$). O clínquer é formado à temperatura entre 1450 °C e 1550 °C (RODRIGUES *et al.*, 2013). Durante a remoção do forno, o clínquer é bruscamente resfriado para ser fragmentado e transformado em pó. Esse material em pó, na presença de água, apresenta uma reação química que provocará o endurecimento do mesmo até adquirir elevadas propriedades mecânicas (TENÓRIO *et al.*, 2003).

2.2.1.2 Adições

A fabricação do cimento Portland possibilita a adição de elementos, além do clínquer, para promover melhorias nas propriedades mecânicas requeridas por

cada tipologia de cimento. Os compostos mais comuns são os materiais carbonáticos, pozolânicos, gesso e a escória de alto forno.

2.2.1.2.1 Material carbonático

Também conhecido como fíler calcário, o material é proveniente de rochas calcárias moídas. Essas rochas são compostas por carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o carbonato de magnésio ($MgCO_3$). Além disso, os calcários são classificados de acordo com o teor de carbonato de magnésio presente na composição, conforme a Tabela 2 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2004).

Tabela 2 – Classificação do calcário pelo teor de MgO.

Classificação	Teor de carbonato de magnésio
Calcítico	Menor que 5%
Magnesiano	Entre 5 a 12%
Dolomítico	Maior que 12%

Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2004).

Segundo Batic *et al.* (2013), o fíler calcário foi massivamente aplicado com o material de adição ao cimento Portland, sendo adicionado um teor entre 5 a 35% do material à composição do cimento. Pelletier-Chaignat *et al.* (2012) acrescenta ainda que o fíler promove uma redução no custo do cimento. Isto se explica pela granulometria fina do componente, preenchendo o núcleo da mistura. Além disso, o material acelera a hidratação do cimento Portland e aumenta a resistência mecânica em menor tempo.

2.2.1.2.2 Gesso

O gesso é formado a partir do sulfato de cálcio hemihidratado ($CaSO_4.0{,}5H_2O$). O material é constituído a partir do uso de gipso durante à calcinação. O gipso é uma rocha sedimentar, composto por gipsita, anidrita e impurezas, como dolomita, material orgânico, argilominerais e calcita. Em suma, a calcinação

consiste na desidratação da gipsita à temperatura entre 140 a 160 °C (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014).

As indústrias cimenteiras têm aplicado um teor entre 3 a 5% de gesso na composição do cimento para retardar à reação química do cimento na presença de água (CAILLAHUA; MOURA, 2018). Durante à reação do aluminato tricálcico ($3\mathrm{CaO}.\mathrm{Al_2O_3}$) com a água, provoca o imediato endurecimento do cimento. Com isso, o seu uso seria inviabilizado na construção civil. Mediante a isso, o gesso é empregado para retardar à reação química durante a mistura da água com cimento, permitindo maior maleabilidade durante o uso (CHANDARA *et al.*, 2009). Por isso, o gesso está presente em todos os tipos de cimento Portland.

2.2.1.2.3 Escória de alto forno

A escória de alto forno é um subproduto do processo metalúrgico, obtido durante a fundição de metais. Este material é proveniente das impurezas removidas e são formadas por silicatos metálicos, metais na forma elementar, sendo constituídos basicamente por óxidos de cálcio (CaO), ferro (FeO), magnésio (MgO) e alumínio ($\mathrm{Al_2O_3}$), e mistura de óxidos. Devido a sua composição química semelhante ao clínquer como aglomerante, com quantidades consideráveis de silicato dicálcico ($\mathrm{Ca_2SiO_4}$). O material promove mudanças nas propriedades, como permeabilidade, aumento de resistência a sulfatos e resistência à compressão para um tempo maior de cura e diminuições da permeabilidade, da reação álcali agregado e do calor de hidratação (ROSSA JUNIOR; PORTELLA, 2012).

2.2.1.2.4 Material pozolânico

A pozolana é definida como material aluminossílicoso ou silicoso, sendo um composto não aglomerante em sua forma natural. No entanto, em baixa granulometria e na presença de água, o material reage quimicamente com hidróxido de cálcio ($\mathrm{Ca\,(OH)_2}$) ou cal hidratada, formando um composto com características de aglomerante. O hidróxido de cálcio ao carbonatar lentamente com o ar, pode formar a calcita ($\mathrm{CaCO_3}$) (PICANÇO; ANGÉLICA; BARATA, 2011).

Leandro *et al.* (2017) destaca que os materiais pozolânicos naturais são compostos por micas, quartzo, feldspato e vidro de aluminossilicato. Por outro lado, as pozolanas artificiais são originadas em tratamentos térmicos ou como subprodutos de atividades industriais. Em adição, as artificiais são divididas em cinzas volantes, argilas calcinadas, escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral, dentre outros. Com a adição de materiais pozolânicos no cimento, é possível aumentar a impermeabilidade, principalmente na aplicação de concretos e às argamassas (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002).

Garcia *et al.* (2015) afirmam que a adição de pozolana ao cimento, é possível aumentar a densidade da mistura devido à baixa granulometria da pozolana, preenchendo vazios presentes no composto formado. Além disso, ocorre o refinamento da estrutura de poros devido aos pontos de nucleação para os produtos de hidratação e alteração de microestrutura da zona de transição entre o agregado e a pasta formada pelo cimento. Isto ocasiona a redução ou extinção de retenção de água sob os agregados, melhorando a impermeabilidade do cimento.

2.2.2 Classes e composições químicas de cimentos Portland

De acordo com Associação Brasileira de Cimento Portland (2018), o cimento Portland (CP) pode ser dividido em onze classes, sendo:

- CP I – Cimento Portland comum: é o tipo de cimento que apresenta apenas adição de gesso, para retardar o tempo de pega do cimento. É aplicado em obras que não há exposição a ambientes desfavoráveis, a exemplo da presença de águas subterrâneas ou sulfatos do solo;
- CP I-S – Cimento Portland comum com adição: apresenta as mesmas características do CP-I, mas possui uma adição de 5% de material pozolânico, garantindo assim, maior impermeabilidade do cimento;
- CP II-E– Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno: apresenta escória de alto-forno em sua composição, sendo utilizado em

estruturas que apresentam desprendimento de calor relativamente lento ou sob ação de sulfatos;

- CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana: com a adição de pozolana, este cimento garante maior durabilidade e impermeabilidade do concreto fabricado, sendo comumente aplicado em obras industriais, subterrâneas e marítimas;
- CP II-F – Cimento Portland composto com fíler: possui materiais carbonáticos em sua composição, sendo aplicado para argamassas de revestimento e assentamento, solo-cimento, estruturas de concreto armado, dentre outros;
- CP III – Cimento Portland de alto-forno: devido à presença de escória de alto-forno em sua composição, conferindo maior durabilidade e impermeabilidade, resistência a sulfatos e à expansão e baixo calor de hidratação. Com isso, é geralmente aplicado em obras de grande porte e meios agressivos como esgotos, pistas de aeroporto, barragens, dentre outros;
- CP IV – Cimento Portland Pozolânico: devido a presença de pozolana e se comparado ao cimento comum, apresenta maior durabilidade e impermeabilidade, e maior resistência à compressão à longo prazo. Por fim, é frequentemente utilizado em grandes volumes de concreto e em obras em ambientes agressivos e em contato com a água;
- CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial: pode apresentar ou não a presença de materiais carbonáticos, mas apresenta alta porcentagem de clínquer + gesso. Com isso, o cimento possui alta resistência inicial, podendo atingir aproximadamente 26 MPa de resistência logo no primeiro dia de produção do concreto. O seu uso é recomendado em obras que exigem desmolde rápido.
- CP-RS – Cimento Portland Resistente a Sulfatos: é utilizado quando o concreto está exposto à meios agressivos de sulfatados, como água marítima, ambientes industriais e canais de esgoto. Além disso, pode ser usado em recuperação estrutural, concreto protendido, dentre outros;

- CP-BC – Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação: possui a função de retardar o desprendimento de calor em concretos de grande porte, impedindo assim, o surgimento de fissuras por meio de energia térmica;
- CP-B – Cimento Portland Branco: devido a presença de baixos teores de manganês, ferro e caulim, substituindo a argila, o cimento apresenta coloração branca. Esse cimento pode ser usado para fins estruturais e não estruturais, como rejuntamento de cerâmica.

A Tabela 3 representa os tipos de cimento mais empregados com as suas respectivas porcentagens de adição.

Tabela 3 – Tipos de cimentos e suas respectivas adições.

Tipo de Cimento	Adições	Sigla
Cimento Portland comum	Escória, pozolana ou filer (até 5%)	CP I - S
	Escória (6-34%)	C II - E
Cimento Portland comum	Pozolana (6-14%)	CP II -Z
	Fíler (6-10%)	CP II - F
Cimento Portland de alto-forno	Escória (35-75%)	CP III
Cimento Portland pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V - ARI

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2018).

2.2.3 Produção brasileira de cimento Portland

A indústria brasileira de cimento obteve notoriedade ao ocupar a sexta posição mundial na produção de cimento Portland, em 2016. A produção naquele ano foi em torno de 57 milhões de toneladas. Em 2016, o setor contava com 100 fábricas em todo território nacional, apresentando uma capacidade produtiva anual de 100 milhões de toneladas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2016). De acordo com Pugliesi (2020), as classes de cimentos CP II são usadas em aplicações gerais. Além disso, este tipo representa o maior consumo no mercado brasileiro, sendo responsável por mais de 60% do consumo total.

2.3 TIJOLO SOLO-CIMENTO

O tijolo solo-cimento, também conhecidos como tijolo ecológico, é um material alternativo de baixo custo proveniente da combinação de partes proporcionais de solo, cimento e água. Após à mistura, o produto endurece após ser prensado, podendo ser de fabricação manual ou mecânica, e posteriormente curado. Com isso, adquire resistência e durabilidade necessárias para suportar as cargas submetidas. Além disso, o tijolo ecológico dispensa a queima em fornos e permite agregar materiais alternativos, como resíduos sólidos, em sua composição. Consequentemente, é possível conferir melhores propriedades mecânicas ao produto (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE TIJOLO ECOLÓGICO, 2018).

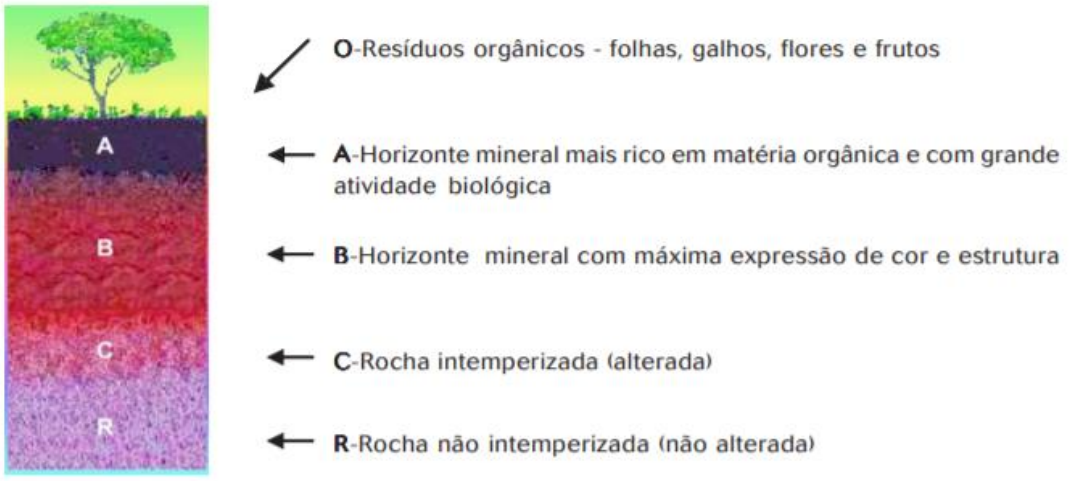
Segundo Porras, Isaac e Morita (2008), o solo representa a maior parcela sobre a massa total do tijolo. Além disso, o cimento representa uma porcentagem entre 5 a 10% da massa do produto, sendo o suficiente para estabilizar o solo e obter as propriedades mecânicas requeridas para o material.

Porém, os aspectos substanciais que afetam as características do tijolo solo-cimento são o teor de umidade, compactação e homogeneização da mistura, tipo e teor de cimento, tipo de solo e cura do mesmo (CAMPOS; NASCIMENTO JUNIOR; BRITO, 2019).

2.3.1 Solo

Segundo Schroeder (1984, *apud* LOPES, 2017), solo é formado a partir de substâncias orgânicas, minerais, água e ar. Para sua formação, são necessárias transformações das substâncias minerais e orgânicas em função de fatores ambientais por um longo período, apresentando estrutura e morfologia definidas. O autor ainda afirma que os componentes minerais são formados por minerais primários e secundários, fragmentos de rochas matriz e substâncias amorfas. Além disso, os componentes orgânicos são compostos por substâncias húmicas recém originadas, resíduos vegetais e animais em decomposição, raízes de plantas e fauna e flora do solo. A Figura 3 ilustra a formação do solo por camada.

Figura 3 – Perfil de solo a partir de camadas existentes.

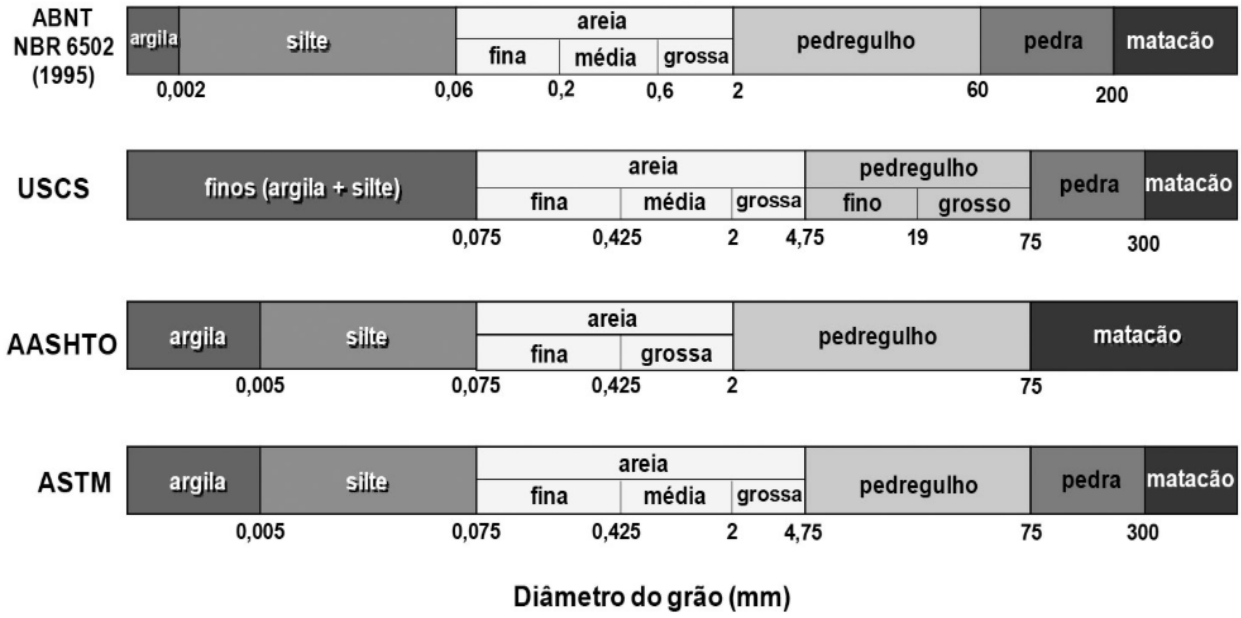


Fonte: Lima; Lima; Melo (2007).

Para definição do tipo de solo, são observados os principais atributos quanto às características morfológicas, seguidas pela cor, consistência, textura e estrutura do objeto em estudo. A cor do solo representa importante característica, pois as diferentes cores são dependentes de uma variação de materiais orgânicos e minerais que formam o terreno. Outro importante fator é representado pela consistência, referenciando uma relação entre forças de coesão e de adesão sobre os produtos do solo. A força de coesão define uma afinidade entre partículas sólidas e de adesão uma atração entre às moléculas de água e partículas (LIMA; LIMA; MELO, 2007).

A textura descreve o comportamento físico-hídrico e químico do solo, expressado pela composição granulométrica de areia, silte, argila e da fase mineral do solo. A composição granulométrica é classificada de acordo com diâmetro dos componentes, conforme a Figura 4 (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Figura 4 – Definição da textura da partícula em função do diâmetro.



Fonte: Almeida *et al.* (2012).

Ainda de acordo com as características dos solos, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (1999, *apud* LIMA; LIMA; MELO, 2007) afirmam que os tipos de solos podem ser agrupados conforme grupamento textural a partir da Tabela 4.

Tabela 4 – Definição do grupamento textural.

Grupamento textural	Definição
Muito argilosa	Solos com porcentagem de argila maior que 60%.
Argilosa	Solos com porcentagem de argila entre 35 a 60%.
Siltosa (ou “limosa”)	Solos com porcentagem de argila menor que 35% e areia inferior à 15%.
Média (ou “franca”)	Solos com porcentagem de argila inferior à 35%, com mais de 15% de areia e que não apresente textura arenosa.
Arenosa	Solos com porcentagem de areia maior ou igual à 70% e sem argila; Ou porcentagem de areia maior ou igual à 75% e argila inferior à 5%; Ou porcentagem de areia maior ou igual à 80% e argila inferior à 10%; Ou porcentagem de areia maior ou igual à 85% e argila inferior à 15%.

Fonte: Lima; Lima; Melo (2007).

Em adição, a Associação Brasileira de Cimento Portland (2000) assegura que os solos arenosos necessitam, em sua maioria, menores quantidades de cimentos em relação aos siltosos e argilosos para a fabricação de tijolo solo-cimento. No entanto, a presença de argila é essencial na composição do solo para mistura de solo e cimento, pois uma vez compactada e hidratada, a argila oferece coesão necessária para manuseio e desmolde dos tijolos após confecção. Para finalizar, a associação brasileira ainda afirma que à presença de matéria orgânica em solos deve ser evitada, uma vez que esta presença pode causar alterações na hidratação do cimento, interferindo diretamente na estabilização do solo utilizado como matéria-prima.

Para Segantini (2000), os solos classificados como arenosos são mais adequados para a fabricação dos tijolos ecológicos. O autor argumenta que este tipo de matéria-prima possui à presença de grãos de areia grossa e pedregulhos, o que beneficia uma quantidade maior de cimento para aglomerar os grãos menores. Como justificativa, a areia grossa e pedregulho são materiais inertes e com exclusiva função de enchimento. O autor ainda complementa que, com base em estudos realizados, um teor de silte somando a argila abaixo de 20% na composição da matéria-prima não possui resistência inicial suficiente para promover a sua compactação. Por fim, é necessário um teor de fração fina para gerar uma resistência inicial na compactação, uma vez que essa fração oportuniza uma coesão durante o processo.

2.3.2 Tipos de tijolos

A partir de variantes, como tipo de projeto, materiais disponíveis, mão de obra especializada e equipamentos para uso, é possível determinar modelos e tamanhos de tijolos disponíveis no mercado brasileiro, como representados na Tabela 5 (PISANI, 2005).

Tabela 5 – Tipos de tijolos e suas respectivas características.

Tipo	Dimensões (mm)	Características
Maciço comum	50 x 100 x 200 50 x 100 x 210	Assentamento com consumo de argamassa similar aos tijolos maciços.
Maciço com encaixe	50 x 100 x 210 50 x 110 x 230	Assentamento com encaixes com baixo consumo de argamassa.
Meio tijolo com encaixes	50 x 100 x 105 50 x 110 x 115	Utilizado para evitar quebras na formação dos aparelhos com juntas desencontradas.
Tijolos com dois furos e encaixes	50 x 100 x 200 62,5 x 125 x 250 75 x 150 x 300	Assentamento a seco, com cola branca ou argamassa plástica. Tubulação adentram os furos verticais.
Meio tijolo com furo e encaixe	50 x 100 x 100 62,50 x 125 x 125 75 x 150 x 150	Utilizado para acertar os aparelhos, sem que haja quebras.
Canaletas	50 x 100 x 200 62,5 x 125 x 250 75 x 150 x 300	Empregado para execução de vergas, cintas de amarração, reforços estruturais e passagem de tubos na horizontal.

Fonte: Pisani (2005).

2.3.3 Vantagens e limitações

O tijolo representa um material alternativo para suprimir uma demanda de unidades habitacionais, uma vez que o produto oferece uma redução considerável no custo total de obra. Esta diminuição é proveniente da redução de materiais utilizados, principalmente para assentamento de tijolos, além de dispensar grandes pilares para sustentação. Em adição, o produto gera menor quantidade de resíduos (FRAGA *et al.*, 2016).

Cordeiro, Conceição e Lima (2006) complementam que os tijolos ecológicos evitam a emissão de gases poluentes e representa uma diminuição no consumo de energia para sua fabricação, uma vez que não há queima e exige menores deslocamentos durante o processo. Ainda, o objeto apresenta durabilidade e resistência por um baixo custo de produção. Por fim, os autores afirmam ser possível reduzir em cerca de 40% o custo total para construção de uma casa.

De acordo com Segantini e Wada (2011), o tijolo apresenta boas propriedades para conforto acústico e térmico, superando os materiais usados na construção convencional. Os autores destacam ainda a não necessidade de mão de obra especializada, devido à fabricação empregar um uso de tecnologia simples, e a grande disponibilidade de solo para uso como matéria-prima.

Por outro lado, como há uma grande variabilidade de tipos de solos no Brasil, sendo necessário executar ensaios de caracterização, como granulometria, compactação e compressão dos solos utilizados (SILVA, 2005).

3.3.4 Normatização e ensaios

Os tijolos de solo cimento são normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para tal, são utilizadas a seguintes normas à fim de padronizar o produto, garantindo performance necessária para diferentes aplicações:

- NBR 8491: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Esta norma define os requisitos necessários para recebimento do item;
- NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Para tal, o documento estabelece os métodos aplicados para uma verificação dimensional, além da definição da absorção de água e da resistência à compressão para alvenaria sem função estrutural;
- NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento. Por fim, esta

normatização define os requisitos para fabricação de blocos e tijolos utilizando prensas hidráulicas e manuais.

Segundo a norma ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013), os lotes para inspeção devem possuir no mínimo dez mil tijolos. Para cada lote, são escolhidos aleatoriamente dez tijolos a serem submetidos aos ensaios de análise dimensional. Em seguida, serão utilizadas sete amostras para ensaio de compressão simples e os outros três para ensaio de absorção de água.

2.3.4.1 Granulometria do solo

A análise granulométrica de solos quantifica uma distribuição por meio do tamanho das partículas individuais de minerais presentes no solo. Estas partículas podem ser definidas como fragmentos de rochas não alteradas, grãos minerais, nódulos e materiais cimentados, dentre outros. O procedimento visa um rompimento dos agregados do solo, a partir de combinações químicas e mecânicas, para caracterizar as partículas de acordo com o seu tamanho (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Segundo a ABNT, os testes podem ser realizados por peneiramento ou por uma combinação de peneiramento e sedimentação (ABNT NBR 7181:2016).

Como preparação, os ensaios devem ser realizados conforme a ABNT NBR 6457:2016, o qual descreve os métodos de preparação para ensaios de caracterização de solos. Após isso, as amostram devem ser submetidas ao peneiramento de abertura de malha de 2,00 mm, garantindo à quebra de torrões e a permanência apenas de partículas maiores. Após isso, são coletados 120 g da amostra total a serem usados nos ensaios de peneiramento fino e sedimentação. Além disso, três amostras com 100 g do material passante são tomadas para determinação da umidade higroscópica (W). O material retido na peneira de 2,00 mm deve ser colocado em estufa a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C até atingir a constância de massa, definindo o percentual de peneiramento grosso do solo. (ABNT NBR 7181:2016).

Para o ensaio de sedimentação, o material coletado é transferido para um béquer, por meio de proveta portando uma solução de hexametafosfato de sódio. Em seguida, o béquer é agitado até que toda a amostra esteja imersa, mantendo em repouso por no mínimo doze horas. Posterior a isso, a amostra é submetida durante quinze minutos a um aparelho dispersor. Em seguida, o material é transferido para uma proveta, agitando por sessenta segundos. Por fim, é mergulhado um densímetro da dispersão, coletando os dados por períodos estabelecidos na norma (ABNT NBR 7181:2016).

Para esse ensaio, Ruiz (2005) descreve que as partículas maiores e mais densas, como a areia, assentam no fundo da proveta, partículas de silte sedimentam em algumas horas e de argila permanecem suspensas durante um considerável tempo. O ensaio é representado pela Figura 5.

Figura 5 – Ensaio de sedimentação do solo.

Fonte: Neves *et al.* (2010).

Por outro lado, o ensaio por peneiramento, a amostra é lavada em peneira de 0,075 mm, sob água destilada à baixa pressão. As partículas retidas na peneira citada anteriormente são novamente postas em estufa com temperatura entre 105 °C e 110 °C até atingirem a constância de massa. A seguir, este material é peneirado por abertura de malhas de 1,20 mm, 0,60 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. São computadas as massas dos objetos retidos em cada peneira. Para o material retido na peneira 2,00 mm, é novamente peneirado em

abertura de malhas de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5mm e 4,8 mm (NBR 7181:2016). A Figura 6 representa o ensaio por peneiramento auxiliado por um agitador mecânico.

Figura 6 – Ensaio de peneiramento do solo por agitação mecânica.

Fonte: Splabor (2018).

A partir dos valores coletados, é possível caracterizar a textura do solo por meio de sua respectiva dimensão seguindo a norma ABNT NBR 7181:2016 (versão corrigida: 2018). Para isso, a norma define a massa total da amostra seca de acordo com a Equação 1:

$$M_s = \frac{(M_T - M_g)}{(100 - W)} x100 + M_g \qquad \text{Eq. 1}$$

Onde,

- M_s representa a massa total da amostra seca, expressa em gramas (g);
- M_T representa a massa da amostra seca em temperatura ambiente, expressa em gramas (g);
- M_g representa a massa da amostra seca retida na peneira de 2,00 mm, expressa em gramas (g);
- W representa a umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,00 mm, expressa em porcentagem (%).

Para as porcentagens de materiais retidos na peneira de 2,00 mm, utiliza-se a Equação 2:

$$Q_g = \frac{(M_s - M_r)}{M_s} x100 \qquad \text{Eq. 2}$$

Onde,

- Q_g representa o material passante em cada peneira, expresso em porcentagem (%);
- M_s representa a massa total da amostra seca, expressa em gramas (g);
- M_r representa a massa do material retido em cada peneira, expressa em gramas (g).

Por outro lado, para as porcentagens do material passante na peneira 2,00 mm, utiliza-se a Equação 3:

$$Q_f = \frac{M_w\, x\, 100 - M_r\, (100 + W)}{M_w\ \ x\, 100}\, x\, N \qquad \text{Eq. 3}$$

Onde,

- M_w representa a massa do material úmido submetido ao peneiramento fino, expressa em gramas (g);
- W representa a umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm, expressa em porcentagem (%);
- M_r representa a massa do material retido em cada peneira, expressa em gramas (g);
- N representa cada material passante na peneira 2,00 mm, expresso em porcentagem (%).

A porcentagem de material em suspensão no ensaio de sedimentação é definida pela Equação 4:

$$Q_s = N\, x\, \frac{\rho_s}{(\rho_s\ x\, \rho_{md}\,)} x\, \frac{V \rho_{wc}\, (L - L_d\,)}{\frac{M_w}{(100 + W)} x\, 100} \qquad \text{Eq. 4}$$

Onde,

- Q_s representa o solo em suspensão durante a leitura do densímetro, expresso em porcentagem (%);

- V é o volume da proveta igual a 1000 cm³;
- ρ_s representa a massa específica dos grãos de solos, expressa em g/cm³;
- ρ_{md} representa a massa específica do meio dispersor na temperatura de calibração do densímetro em 20 °C, expressa em g/cm³;
- ρ_{wc} é a massa específica da água na temperatura de calibração do densímetro em 20 °C, expressa em g/cm³;
- L representa a leitura do densímetro na suspensão;
- L_d representa a leitura do densímetro no meio dispersor;
- M_w representa a massa do material úmido submetido à sedimentação, expressa em gramas (g);
- W representa a umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,00 mm, expressa em porcentagem (%).

Por fim, o diâmetro máximo das partículas de solo em suspensão é definido a partir da equação da lei de Stokes, conforme Equação 5:

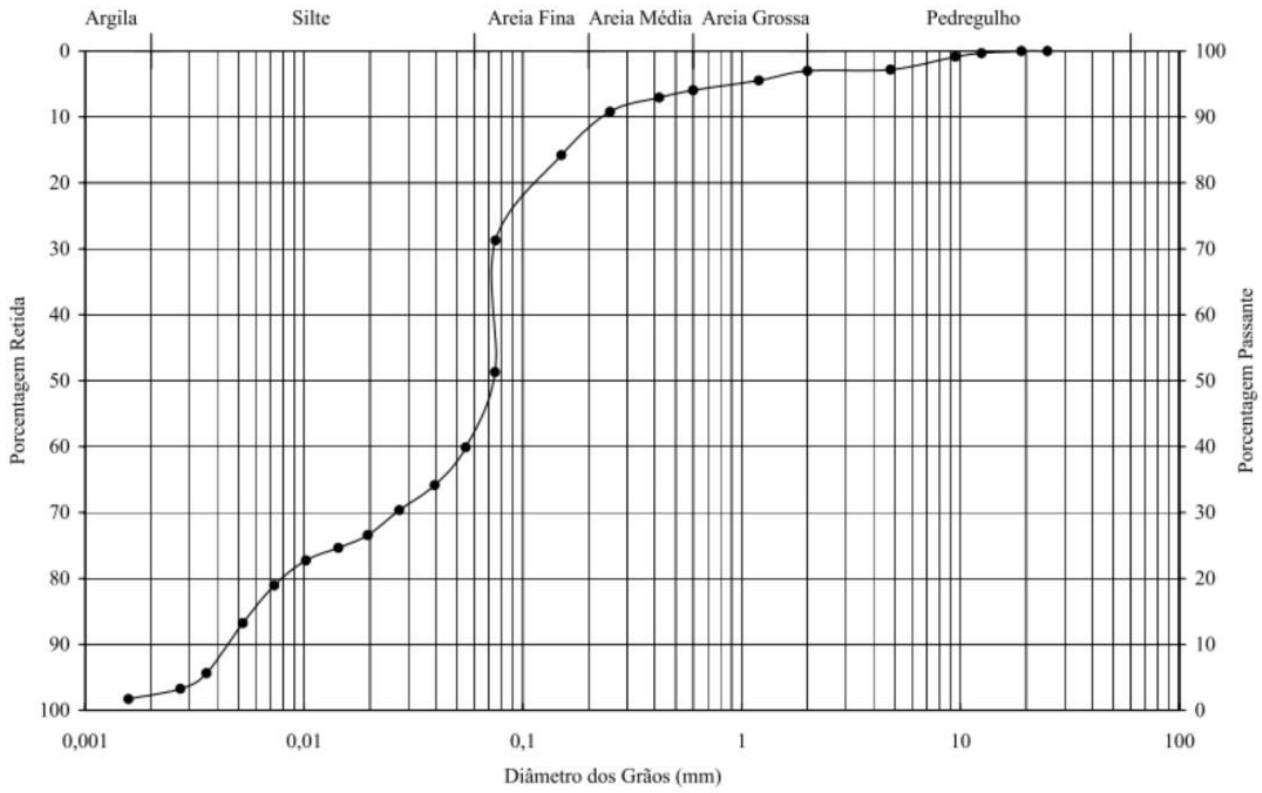
$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{\rho_s - \rho_{md}} x \frac{z}{t}} \qquad \text{Eq. 5}$$

Onde,

- d representa o diâmetro máximo das partículas em milímetros (mm);
- μ é o coeficiente de viscosidade do meio dispersor, em g x s/cm²;
- z é a altura de queda das partículas, expressa em centímetros (cm);
- t é o tempo de sedimentação, expressa em segundos (s);
- ρ_s é a massa específica do grão do solo, de acordo com a norma ABNT NBR 6458:2016, expressa em g/cm³;
- ρ_{md} representa a massa específica do meio dispersor, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm³).

A partir desses resultados, é possível caracterizar a composição granulométrica do solo por meio da curva de distribuição granulométrica, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Gráfico da curva granulométrica.

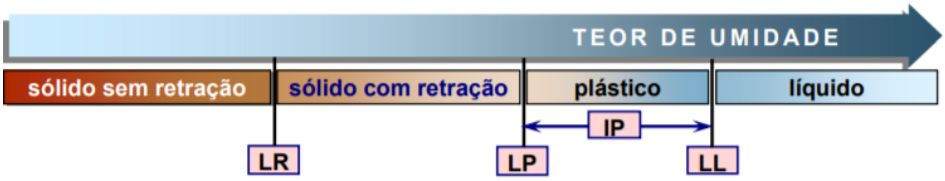


Fonte: Marinho (2020).

2.3.4.2 Limites de Atterberg

Também conhecido como limites de consistência, estes limites definem o grau de umidade do solo, podendo ser classificado como sólido, plástico ou líquido a partir da presença de argila em sua composição (Figura 8). O material em estado plástico apresenta propriedades de plasticidade, sendo resistente a rápidas deformações, sem ocasionar ruptura, fissura ou variação volumétrica. O estado líquido não possui forma definida e não demonstra resistência ao cisalhamento. Por fim, o sólido não sofre mais alterações volumétricas devido à secagem (FRIORI, 2015).

Figura 8 – Estado do solo em função ao teor de umidade.



Fonte: Neves *et al.* (2010).

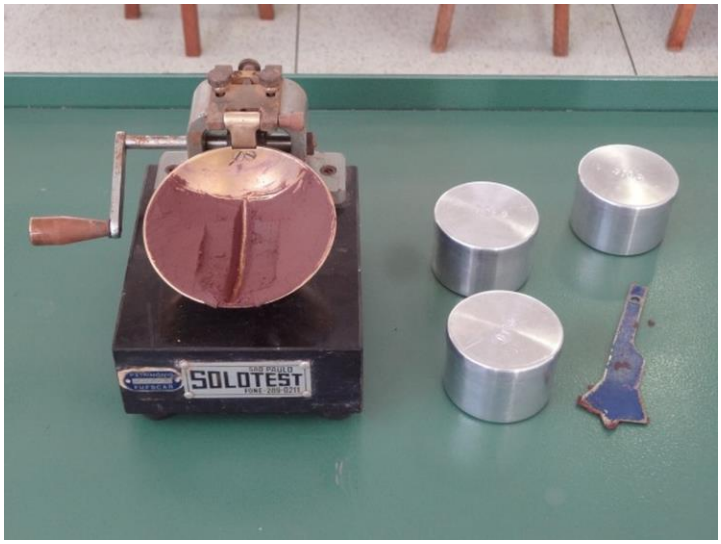
Para caracterizar o estado do solo a partir do teor de umidade, os métodos de limites de Atterberg são aplicados. Estes limites são definidos pelo limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) (NEVES *et al.,* 2010).

Como preparação das amostras a serem ensaiadas, deve-se seguir a norma NBR 6457:2016. Para isso, é necessário peneirar o solo em abertura de malha de 0,42 mm e tomar cerca de 200 g do material passante para os ensaios de LL e LP.

O limite de liquidez (LL) é definido pelo teor de umidade entre a transição do estado plástico para o líquido. Este limite está diretamente relacionado a uma capacidade de absorção de água pelo solo. Para isso, o aparelho de Casagrande é utilizado durante o ensaio. Este equipamento possui uma concha metálica interligada a uma manivela, que após se movimentar, provoca uma queda da concha, movimento conhecido como golpe. Inicialmente, é aplicado um corte central na amostra, com auxílio de um cinzel, com uma espessura constante igual à 1 cm (Figura 9). O limite de liquidez é obtido a partir do teor de umidade suficiente para fechar a ranhura com vinte e cinco golpes (NEVES *et al.*, 2010).

Para obter a umidade correspondente ao número de golpes ideais, deve-se construir um gráfico com ordenadas em escala logarítmica, representando um número de golpes, e as abcissas em escala aritmética representando os teores correspondentes. Para isso, é traçada uma reta, obtendo o valor correspondente a 25 golpes. (ABNT NBR 6459:2016).

Figura 9 – Ensaio de limite de liquidez.



Fonte: Consolotec (2018).

O limite de plasticidade (LP) corresponde ao teor necessário para alterar a partir do estado sólido para o plástico. O ensaio consiste no uso de uma placa de vidro com face rugosa e um cilindro padrão. Durante o ensaio, é selecionado uma amostra de pasta a ser rolada até atingir o mesmo diâmetro do cilindro ou após o aparecimento de fissuras, conforme Figura 10. Após atingir as condições anteriores, o teor do rolo gerado representa o limite de plasticidade (FRIORI, 2015). O ensaio deve seguir as normativas presentes na ABNT NBR 7180:2016.

Figura 10 – Ensaio de limite de plasticidade.

Fonte: Sousa (2019).

A NBR 7180:2016 define o índice de plasticidade, em porcentagem, a partir da Equação 6:

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq. 6}$$

Onde,

- IP representa o índice de plasticidade, em porcentagem (%);
- LL representa o limite de liquidez, em porcentagem (%);
- LP representa o limite de plasticidade, em porcentagem (%).

Finalmente, Neves *et al.* (2010) descreve que os limites de Atterberg dependem do teor de argila encontrado no solo. Os autores ainda acrescentam que os valores para IP e LL para diferentes tipos de solo são representados pela Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de IP e LL para diferentes tipos de solo.

Tipo de solo	**IP (%)**	**LL (%)**
Arenoso	Até 10	Até 30
Siltoso	Entre 5 a 25	Entre 20 a 50
Argiloso	Menor que 20	Menor que 40

Fonte: CRATerre (1979) *apud* Neves et al. (2010).

2.3.4.3 Massa específica e massa específica aparente

Segundo Arteris (2014), a massa específica representa a densidade relativa da relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, desconsiderando os espaços vazios dentro das partículas. Já a massa específica aparente também representa a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, considerando os espaços vazios dentro das partículas.

As massas específicas e específicas aparentes são determinadas a partir da separação de agregados presentes no solo. Por definição, agregados são materiais granulares, sem volume e forma estabelecida, variando de dimensões e propriedades definidas. Os agregados podem ser artificiais ou naturais, sendo os artificiais provenientes de processos industriais, como areias artificiais, rochas britadas, dentro outros e o de origem natural obtidos a partir de partículas da natureza como areia, cascalho e outros (LA SERNA; REZENDE, 2013).

Os agregados miúdos são materiais que passam na peneira de abertura de malha de 9,5 mm, passando quase totalmente na peneira 4,75 mm, mas ficando retido, em maior parte, na peneira 0,075 mm (ABNT NBR NM 52:2009). Por outro lado, grãos de pedregulhos são definidos como partículas retidas na peneira de abertura de malha de 4,8 mm (ABNT NBR 6458:2016).

A norma ABNT NBR NM 52:2009 estabelece a massa específica e massa específica aparente para os agregados miúdos. O volume de água adicionada ao frasco é determinado conforme a Equação 7.

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \qquad \text{Eq. 7}$$

Onde,

- V_a representa o volume de água adicionado ao frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³);
- m_1 representa a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas (g);
- m_2 representa a massa total (frasco + agregado + água), em gramas (g);
- ρ_a representa a massa específica da água, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

Com isso, a massa específica aparente do agregado seco é definida de acordo com a Equação 8:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \qquad \text{Eq. 8}$$

Onde,

- d_1 representa a massa específica aparente do agregado seco, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);
- m representa a massa da amostra seca em estufa, em gramas (g);
- V representa o volume do frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³);
- V_a representa o volume de água adicionado ao frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

Em seguida, a massa específica do agregado saturado superfície seca é representada pela Equação 9.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde,

- d_2 representa a massa específica do agregado saturado superfície seca, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);
- m_s representa a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas (g);
- V representa o volume do frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³);
- V_a representa o volume de água adicionado ao frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

Finalmente, a massa específica é obtida a partir da Equação 10:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde,

- d_3 representa a massa específica do agregado, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);
- m representa a massa da amostra seca em estufa, em gramas (g);
- m_s representa a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas (g);
- V representa o volume do frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³);
- V_a representa o volume de água adicionado ao frasco, expresso em centímetros cúbicos (cm³);
- ρ_a representa a massa específica da água, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

Por outro lado, a ABNT NBR 6458:2016 (versão corrigida: 2017) determina a massa específica de grãos de solo que passam na peneira de abertura de malha 4,8 mm. Para determinar a massa específica, utiliza-se a Equação 11:

$$\rho_s = \frac{\frac{M_1 \text{ x } 100}{(100 + w)}}{\left[\frac{M_1 \text{ x } 100}{(100 + w)}\right] + M_3 - M_2} \; x \; \rho_{w(T)} \quad \text{Eq. 11}$$

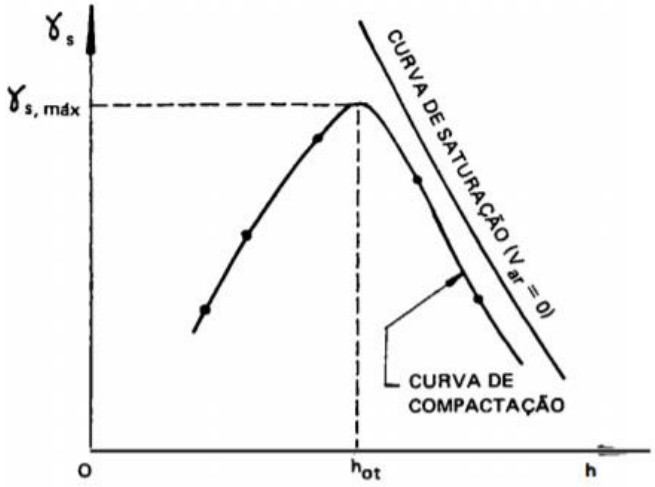
Onde,

- ρ_s representa a massa específica dos grãos do solo, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);
- M_1 representa a massa do solo úmido, em gramas (g);
- M_2 representa a massa do picnômetro ou balão volumétrico + solo + água, em gramas (g);
- M_3 representa a massa do picnômetro ou balão volumétrico cheio de água até a marca de referência, expresso em gramas (g);
- w representa a umidade inicial da amostra, em porcentagem (%);
- $\rho_{w(T)}$ representa a massa específica da água, à temperatura do teste, obtido na Tabela A.1, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

2.3.4.4 Compactação do solo

A compactação do solo é definida de um efeito mecânico a ser aplicado no solo, promovendo uma diminuição nos índices de vazios. Esta redução é obtida a partir da expulsão de água intersticial e pela expulsão do ar nos poros presentes na terra. O processo de compactação visa tornar um material mais denso, aumentando o peso específico aparente. Como consequência, ocorre um aumento da resistência ao cisalhamento, reduzindo a compressibilidade e aumentando a resistência à erosão. Além disso, o peso específico aparente seco varia de acordo com a umidade presente no solo. Para umidade baixa, há uma resistência na redução de vazios, devido ao alto atrito entre as partículas. Por outro lado, altas umidades podem gerar excesso de deslizamento entre partículas, reduzindo o peso específico. Portanto, para atingir o peso específico máximo ($\gamma_{dmáx}$), será necessário um teor de umidade ótimo (W_{ot}), definindo a compactação estável da terra, conforme a Figura 11 (TRINDADE *et al.*, 2008).

Figura 11 – Curva de compactação.



Fonte: Caputo (1988).

O ensaio de compactação determina a relação de teor de umidade e massa específica aparente seca dos solos, após serem compactados. O ensaio baseia-se na aplicação de energia mecânica de compactação, por meio de uma quantidade de golpes de um soquete sobre o material alocado em um molde. Como resultado, a massa específica resultante depende da umidade presente no solo (ABNT NBR 7182:2016). Para determinar a massa específica aparente seca, utiliza-se a Equação 12:

$$\rho_d = \frac{M_u \, x \, 100}{V(100 + W)} \qquad \text{Eq. 12}$$

Onde,

- ρ_d representa a massa especifica aparente seca, expresso em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);
- M_u representa a massa úmida do solo compactado, em gramas (g);
- V representa o volume útil do molde cilíndrico, em centímetros cúbicos (cm³);
- W representa o teor de umidade do solo compactado, em porcentagem (%).

2.3.4.5 Prensagem manual ou hidráulica

Para fabricação de tijolos de solo-cimento, são utilizadas prensas hidráulicas ou manuais para conferir moldagem ao objeto. O processo de prensagem é de

suma importância, uma vez que uma maior compactação, irá propiciar um melhor produto. Para isso, o solo deve atender à seguintes características seguindo a ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013), além de não conter matéria orgânica em quantidade prejudicial à hidratação do cimento:

a) 100% de material que passa na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, de acordo com a ABNT NBR NM ISSO 3310-1;
b) 10% a 50% de material que passa na peneira com abertura de malha 0,075 mm, de acordo com a ABNT NBR ISO 3310-1;
c) Limite de liquidez menor ou igual a 45%;
d) Índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

No processo manual, a terra é adicionada ao reservatório presente na prensa e é aplicada uma força manual por meio de uma alavanca (Figura 12). Pela simplicidade do processo, o maquinário apresenta menor custo com relação ao equipamento hidráulico.

Figura 12 – Prensa manual para fabricação de tijolo solo-cimento.

Fonte: Verde Equipamentos (2019).

Por outro lado, a prensagem hidráulica (Figura 13) utiliza equipamentos mecânicos para compactar o solo. Com isso, é possível atingir maiores níveis de compactação se comparado ao processo manual. No entanto, esse processo

demanda equipamentos com maior custo e uma maior necessidade de manutenção constante, se comparado à prensa manual.

Figura 13 – Prensa hidráulica para fabricação de tijolo solo-cimento.

Fonte: Eco Máquinas (2019).

2.3.4.6 Cura

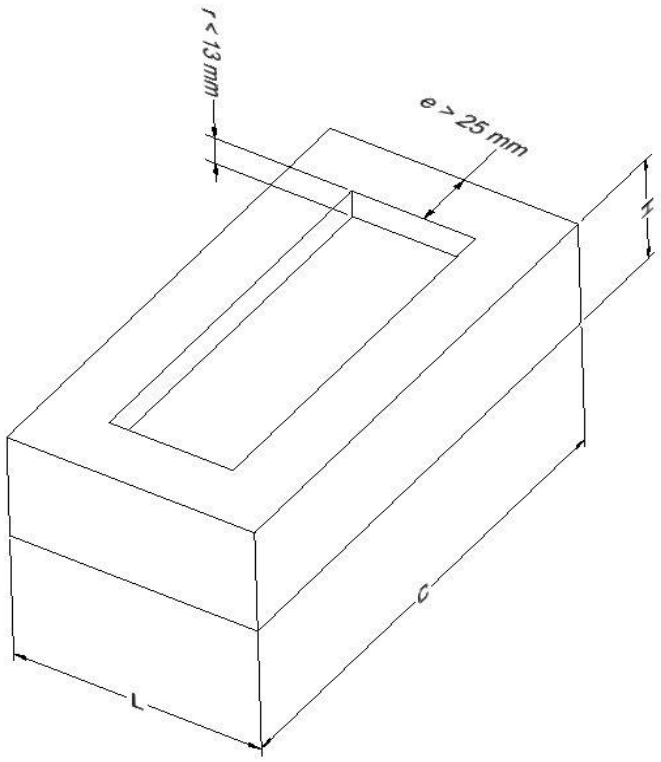
Com o intuito de garantir a reação química da mistura entre as partículas do solo com o cimento, é necessário hidratar os tijolos produzidos durante um determinado período. Ao decorrer de seis horas após a prensagem, os tijolos devem ser hidratados periodicamente durante um período de sete dia com a finalidade de adquirir a resistência máxima da mistura. Mesmo estabilizado, o produto de solo-cimento precisa manter a umidade para promover a reação química, sem ocorrer a perda para o meio ambiente. Um método para evitar a evaporação da água consiste em cobrir os itens com lona plástica para garantir uma cura correta (BETSUYAKU, 2015).

Para Campos, Junior e Brito (2017), a cura correta dos tijolos solo-cimento é importância para evitar uma rápida secagem dos produtos, ocasionando perda de resistência. Por fim, a ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013) estabelece que os tijolos devem ser utilizados após um período mínimo de 14 dias após confeccionados.

2.3.4.7 Análise dimensional

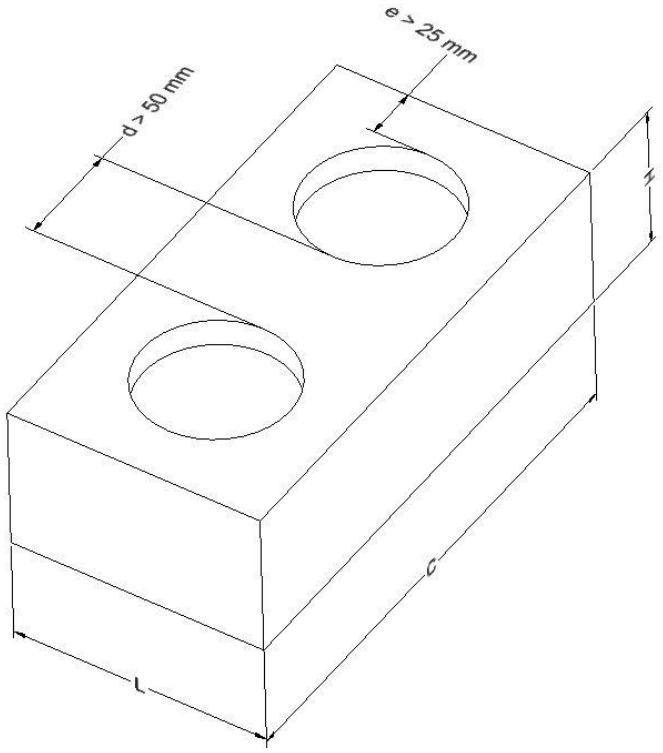
De acordo com a ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013), o tijolo solo-cimento pode apresentar geometria maciça ou vazada. Por definição, o tijolo maciço (Figura 14) apresenta um volume igual ou superior a 85% do seu volume total aparente, podendo ter reentrâncias em uma das faces maiores. Por outro lado, o tijolo vazado possui furos verticais, sendo o seu volume total inferior a 85% do volume total aparente e espessura mínima de acordo com a Figura 15.

Figura 14 – Tijolo maciço de solo-cimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Tijolo vazado de solo-cimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tijolo deve possuir formato de um paralelepípedo retangular, seguindo as seguintes dimensões nominais com uma tolerância de ±1,00 mm segundo a Tabela 7:

Tabela 7 – Tipos de tijolos solo-cimento e suas respectivas dimensões.

Tipos	Comprimento (C) (mm)	Largura (L) (mm)	Altura (A) (mm)
Maciço	200	100	50
Vazado	240	120	70

Fonte: ABNT NBR 8491:2012.

Seguindo as referências das Figuras 14 e 15, temos que:

- Comprimento do tijolo (C): maior dimensão das faces de assentamento;
- Largura do tijolo (L): menor dimensão das faces de assentamento;
- Altura do tijolo (H): distância entre as faces de assentamento.

Com isso, a análise dimensional é praticada pelo uso de paquímetro ou escala metálica com uma precisão de 0,5 mm. Para cada medida determina-se as dimensões em três pontos distintos. Por fim, a medida de cada face é obtida pela média das três verificações dimensionais (ABNT NBR 8492:2012).

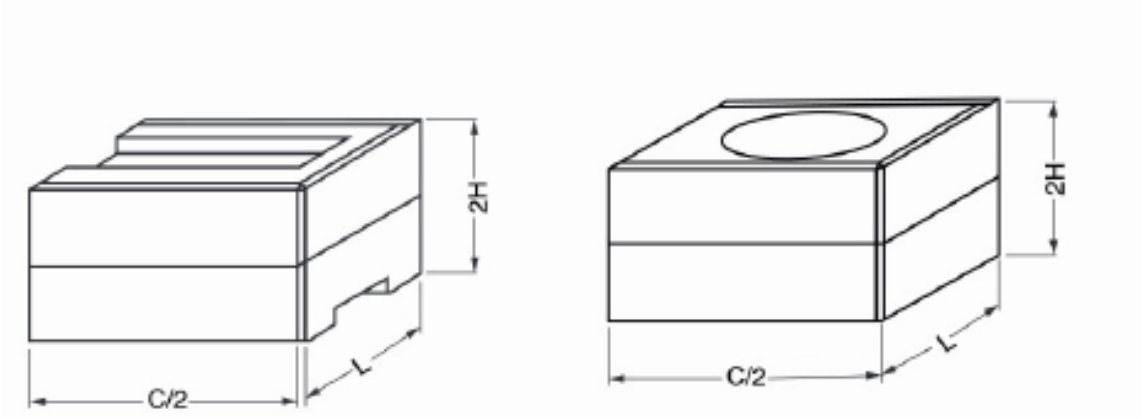
2.3.4.8 Resistência à compressão simples

A compressão pode ser definida como um esforço axial que propende um encolhimento do material submetido a este esforço. Em adição, os corpos submetidos ao esforço podem sofrer deformações elásticas ou plásticas. Portanto, a resistência à compressão é estabelecida como a capacidade de resistir a esforços de compressão sem ocorrer ruptura do objeto (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A norma ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013) determina que as amostras ensaiadas de tijolos solo-cimento não podem apresentar a média de valores para resistência à compressão inferior a 2,0 MPa (20 kgf/cm²) e valor individual menor que 1,7 MPa (17 kgf/cm²) com idade mínima de sete dias após confeccionado.

Para realizar o ensaio, deve-se cortar o tijolo ao meio de forma perpendicular à maior dimensão (Figura 16). Em seguida, as faces maiores devem ser superpostas, ligando às com uma camada de pasta de cimento Portland. Em adição, deve-se aplicar a camada de cimento nas faces superiores e inferiores à fim de manter as faces planas. Após endurecidos, os corpos de prova serão imersos em água por no mínimo seis horas antes do ensaio. Para realizar o ensaio de resistência à compressão simples, será aplicada uma carga uniforme de compressão por meio de uma máquina de ensaio (Figura 17), sendo gradativamente aumentada até provocar a ruptura da amostra (ABNT NBR 8492:2012 VERSÃO CORRIGIDA:2013).

Figura 16 – Corte perpendicular dos corpos de prova.



Fonte: ABNT NBR 8492:2012.

Figura 17 – Máquina de ensaio à compressão simples.

Fonte: Portal do Concreto (2018).

Os valores individuais de resistência à compressão simples são obtidos por meio da Equação 13:

$$f_t = \frac{F}{S} \qquad \text{Eq. 13}$$

Onde,

- f_t representa a resistência à compressão simples, expressa em megapascals (MPa);

- F representa a carga de ruptura do corpo de prova, expressa em newton (N);
- S representa a área de aplicação da carga, expressa em milímetros quadrados (mm²).

2.3.4.9 Absorção de água

A absorção de água pode ser definida como uma relação entre a massa seca e massa total de água absorvida pelo tijolo. Esta característica é relevante para garantir a segurança de edificações, uma vez que pode promover um acréscimo de peso na alvenaria. Além disso, excesso de água ocasiona dificuldades na aderência de argamassa, devido uma perda de água presente na composição da argamassa para as estruturas compostas por tijolos (ROCHA *et al.*, 2017). Masson *et al.* (2016) afirma que a absorção de água está relacionada com porosidade dos materiais, uma vez que uma maior a porosidade do objeto, maior será a absorção de água.

Para os tijolos solo-cimentos, a absorção de água não pode ser superior à 20%, nem apresentar valores individuais maiores que 22% para idade mínima de sete dias de fabricados (ABNT NBR 8491:2012).

A norma NBR 8492:2012 (versão corrigida: 2013) define que, primeiramente, os corpos de prova devem ser colocados em estufa, a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C, até atingir a constância de massa. Após obter os valores do ensaio, os tijolos são imersos em um tanque de água, com toda superfície coberta por água, durante vinte e quatro horas. Novamente, os valores são coletados.

Para determinar a absorção de água, utiliza-se a Equação 14:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1}\ x\ 100 \qquad \text{Eq. 14}$$

Onde,

- A representa a absorção de água, expressa em porcentagem (%);

- m_1 representa a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g);
- m_2 representa a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

2.4 O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

O eminente esgotamento de recursos naturais e a necessidade de melhores políticas de conservação ambiental tem forçado o ramo da construção civil a utilizar materiais alternativos para frearem os elevados índices de devastação ambiental. O tijolo solo-cimento tem sido uma grande alternativa para promover a sustentabilidade de edificações. No entanto, uma grande variabilidade de tipos de solo no Brasil tem impulsionado novos estudos de materiais alternativos para corrigir ou melhorar as propriedades mecânicas de solos. Neste conceito, é possível destinar resíduos sólidos descartados irregularmente no meio ambiente, além de promover uma redução no custo de fabricação de tijolos solo-cimento.

2.4.1 Cal hidratada

O óxido de cálcio (CaO), comercialmente conhecido como cal, é um aglomerante aéreo mineral ou inorgânico, originado pela calcinação de rochas calcárias (MARINHO, 2015). Este elemento é bastante utilizado na construção civil, principalmente no preparo de argamassa para revestimento e assentamento de paredes e muros devido ao baixo custo. A cal pode ser encontrada em diferentes tipos, mas a forma de óxido (cal virgem, ou cal viva) e hidróxido (cal extinta, ou cal hidratada) são os tipos mais comuns no mercado (VOTORANTIM CIMENTOS, 2016).

Luz, França e Braga (2018) afirmam que a produção da cal virgem ocorre por meio da extração de rochas, sendo posteriormente trituradas e sujeito a elevadas temperaturas, entre 850 °C a 900 °C. Esta etapa é nomeada como calcinação do carbonato de cálcio ($\mathrm{CaCO_3}$), conforme a Equação 15.

$$CaCO_3 + calor \rightarrow CaO + CO_2 \qquad \text{Eq. 15}$$

Em seguida, os autores descrevem que após o processo de calcinação, é aplicada uma reação de hidratação do produto, acrescentando água, para obter o hidróxido de cálcio ($\mathrm{Ca(OH)_2}$), de acordo com a Equação 16. O resultante deste processo também é conhecido como cal hidratada, cal apagada, cal extinta ou cal química, sendo um produto pronto para uso.

$$CaO + H_2O \rightarrow \mathrm{Ca(OH)_2} + calor \qquad \text{Eq. 16}$$

A cal hidratada é classificada em três tipos: CH-I, CH-II e CH-III. As classificações são dependentes do teor de pureza de cada classe, sendo CH-I apresentando o maior teor de pureza e o CH-III o de menor teor. Além disso, o produto de maior pureza é caracterizado pelo elevado teor de óxidos totais, apresentando altos valores de cálcio e magnésio, enquanto CH-III apresenta teor limite elevado de materiais carbonáticos (ABNT NBR 6453:2003).

Paiva, Gomes e Oliveira (2007) afirmam ainda que a cal hidratada, quando associada a argamassa, melhora o manuseio do produto, além de possuir boas propriedades como aglomerante, diminuindo assim, a quantidade de cimento Portland utilizado na mistura. Por fim, garante maior resistência a fissuras e rachaduras.

Segundo a International Lime Association (2020), a China liderou a produção mundial de cal em 2019, com produção de 300 milhões de toneladas, representando 70,75% da produção mundial. Já a produção brasileira, ocupou a quinta posição deste ano, correspondendo a 1,98% do total produzido pelo mundo. Este valor representa um total de 8,4 milhões de toneladas de cal, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Produção mundial de cal em 2019.

Países	**Produção em milhões de toneladas (t)**
Brasil	8,4
China	300,0
Estados Unidos	18,0
Índia	16,0
Rússia	11,0
Japão	7,6
Alemanha	7,1
Itália	3,6
República da Coréia	5,2
Turquia	4,7
Ucrânia	2,1
Outros países	37,7
Total	424,0

Fonte: International Lime Association (2020).

Por fim, Galo (2014) afirma que a produção de cal virgem corresponde a 74% e a cal hidratada a 24% de toda a produção no Brasil.

2.4.2 Pó de rocha

Também conhecida como brita ou rocha britada, o material é originado a partir da fragmentação de diferentes tipos de rochas. Como fonte de matéria prima, rochas duras e maciços rochosos, como granito, calcário, basalto e gnaisse, são segmentadas e classificadas de acordo com a granulometria (QUARESMA, 2009).

De acordo com León e Ramírez (2010), a rocha britada é considerada como um agregado que auxilia na redução dos efeitos da retração volumétrica, barateando os custos com cimento, além de desempenhar a função de preencher a mistura.

O Ministério de Minas e Energia (2009) define que os tipos mais comuns são as britas 0, 1, 2, 3, 4 e 5 e pó de brita (Tabela 9). Cada tamanho de grão oferece uma aplicação diferente no ramo da construção civil.

Tabela 9 – Relação de tipos de britas e suas respectivas dimensões.

Tipo	**Granulometria (mm)**
Pó de brita	Menor que 4,8
Brita 0	Entre 4,8 a 9,5
Brita 1	Entre 9,5 a 19,0
Brita 2	Entre 19,0 a 25,0
Brita 3	Entre 25,0 a 50,0
Brita 4	Entre 50,0 a 76,0
Brita 5	Entre 76,0 a 100,0

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2009).

A Votorantim Cimentos (2016) destaca ainda as principais aplicações para cada tipo de brita:

- Pó de brita: devido à sua maleabilidade, o elemento é bastante aplicado nas usinas de asfalto, pré-moldados, argamassas para contrapisos, dentre outros;
- Brita 0: é bastante utilizada na fabricação de vigas e vigotas, lajes pré-moldadas, tubos e outros;
- Brita 1: é considerada como o tipo mais aplicado em concretos, sendo usado na confecção em lajes, colunas e vigas;
- Brita 2: apesar da baixa utilização na construção moderna de concretos, este tipo é empregado em concretos que necessitam de maior resistência, como fundações e pisos mais espessos;
- Brita 3: considerado o seu elevado diâmetro em comparação aos outros tipos, é altamente aplicado para lastros ferroviários, aterros e dreno, sendo pouco usado para concretos;

- Brita 4: por fim, a brita 4 é aplicada para fossas sépticas, gabiões, reforços para pistas de tráfego pesado, entre outros.

Em 2015, o Brasil atingiu a marca de 212.749.004 toneladas de rochas britadas produzidas, conforme a Figura 18. Diante deste valor, estados como São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Santa Catarina registraram juntos o equivalente à 76,52% de toda produção nacional (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2015).

Figura 18 – Produção nacional de rocha britada em 2015.

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral (2015).

Finalmente, o Ministério de Minas e Energia (2009) anuncia que 85% da rocha britada produzida é proveniente de rochas de granito e gnaisse, outros 10% originados pelo dolomito e calcário e por fim, 5% de diabásio e basalto.

2.4.3 Resíduo de mármore

O mármore é uma rocha metamórfica que apresenta um valor superior a 50% de calcita e dolomita na composição, formados a partir do metamorfismo de rochas sedimentares. O mármore é considerado uma rocha mais nobre, porém é considerado um material mais frágil e sofre mais com intempéries devido à composição. São vastamente utilizados para decoração de ambientes interiores,

sendo aplicados em pisos e paredes, mesas, balcões, dentre outros (HAGEMANN, 2011).

Segundo Khaliq *et al.* (2016), aproximadamente 50% do mineral é descartado durante o processo de produção. Além disso, o despejo indevido dos resíduos pode afetar a permeabilidade da água no solo, o rejeito seco pode causar a dispersão do pó no ambiente, causando doenças respiratórias, e podem poluir a água devido as chuvas arrastarem os restos do material.

Com intuito de destinar o pó de mármore a outras finalidades, pesquisadores sugerem o desenvolvimento de um concreto sustentável. Os mesmos sugerem uma substituição parcial da areia natural pelo pó de mármore na composição do concreto, criando assim, um produto economicamente viável. Essa nova mistura faria o custo de produção do concreto cada vez menor, uma vez diminuiria os materiais naturais na composição, e melhoraria a eficiência na redução de poluentes (CHAVHAN; BHOLE, 2014).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2018), o Brasil atingiu uma produção de 8,5 milhões de toneladas de rochas ornamentais acabadas em 2016, sendo o granito com a maior produção seguido do mármore. Porém, o processo de serragem dos blocos elimina muitos rejeitos durante sua operação. Coleti *et al.* (2015) acrescentam ainda que 30% de cada bloco de mármore tornam-se resíduos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

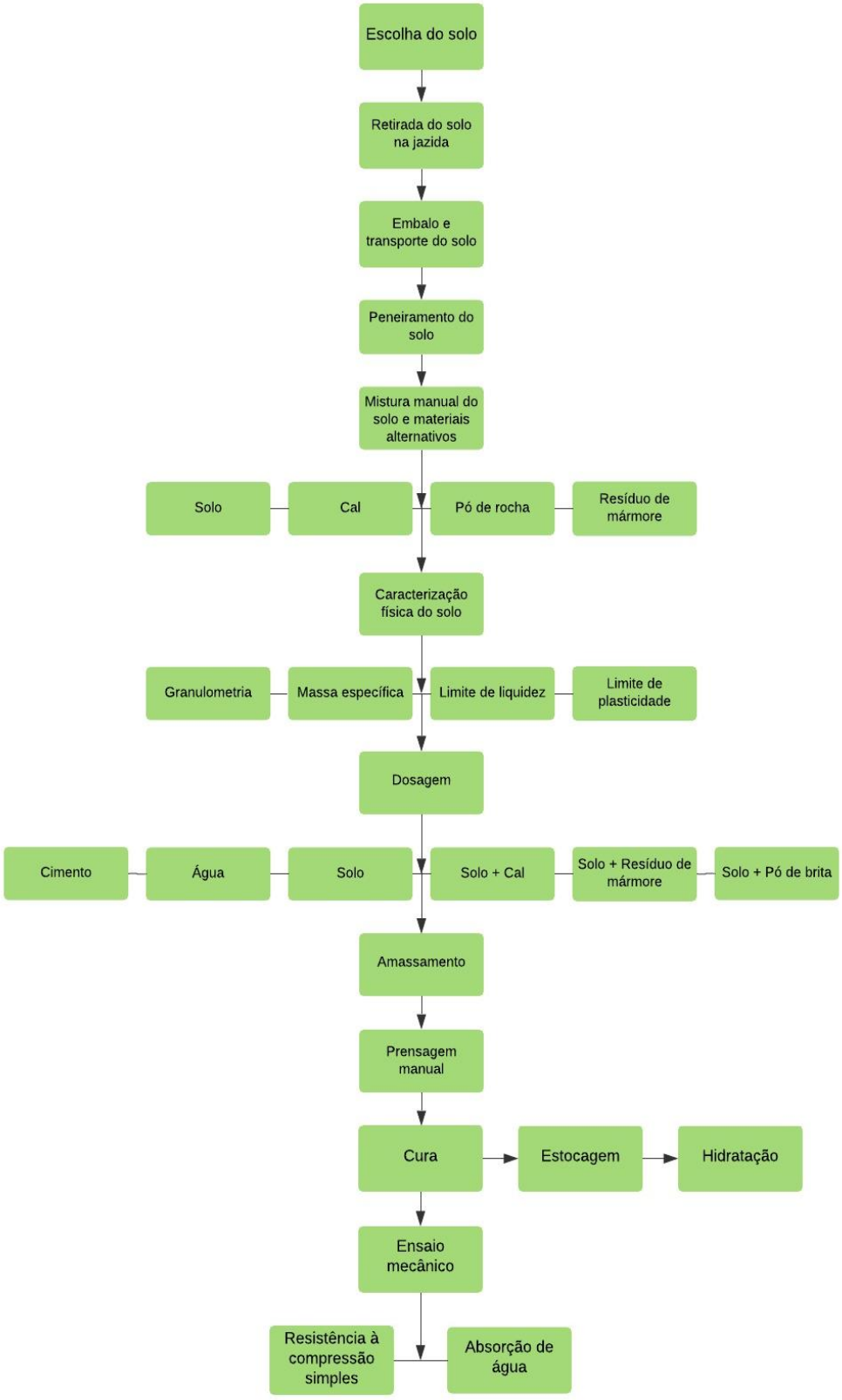
Neste capítulo será apresentada a metodologia para fabricação de tijolos solo-cimento com adição de pó de rocha, cal hidratada e pó de mármore, de acordo com a norma ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013).

De modo geral, foram realizados os ensaios de caracterização das amostras, seguindo os ensaios laboratoriais: análise granulométrica, massa específica e limites de Atterberg (ou limites de consistência). Após, foram efetuados ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água para avaliar as propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova preparados.

Os ensaios de caracterização e absorção de água foram efetuados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES) - Campus Nova Venécia, enquanto o ensaio de resistência à compressão simples foi executado no IFES - Campus São Mateus.

As etapas do processo metodológico estão ilustradas na Figura 19:

Figura 19 – Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova.



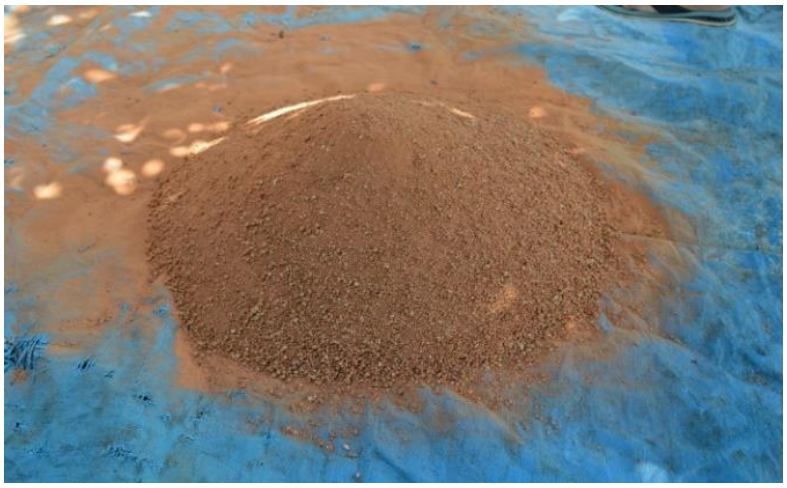
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

O solo em estudo foi gentilmente cedido pela empresa Tercol Terraplenagem e Construções localizada no município de Linhares, Espírito Santo. No entanto, é desconhecida a origem do material. O solo apresenta um aspecto avermelhado, caracterizando como textura argilosa, conforme Figura 20.

Figura 20 – Solo utilizado no experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Cimento

Para a escolha do cimento, foram consideradas as opções disponíveis no mercado local de Linhares e suas respectivas características, como rápido endurecimento e uma alta resistência mecânica inicial, para facilitar o desmolde dos tijolos. Pela pesquisa, foram encontrados os tipos CP III, CP IV e CP V-ARI RS. Logo, foi escolhido o CP V-ARI RS, fabricado pela Votorantim Cimentos S.A. (São Paulo, Brasil), devido às suas propriedades físicas e químicas permitindo uma rápida secagem e obtenção de alta resistência nas primeiras horas após o preparo, contribuindo assim com o desmolde do tijolo produzido. Essa classe de cimento é comumente utilizada em empresas de pré-moldados da região.

3.1.3 Água

Durante o processo de confecção do tijolo solo-cimento, utilizou-se água proveniente de poço artesiano na zona rural do município de São Mateus, Espírito Santo.

3.1.4 Cal hidratada

A cal hidratada é largamente utilizada no ramo da construção civil devido às suas propriedades aglomerantes e suas partículas finas, promovendo uma diminuição na quantidade de materiais utilizados no preparo de argamassa. Estudos realizados comprovam uma aplicabilidade na substituição de cal pelo cimento como material aglomerante na composição de tijolos fabricados pelo uso de solo (FIGUEIREDO; SILVA; NEVES, 2011; FONSÊCA, 2018).

Com isso, o elemento pode diminuir um percentual de cimento aplicado ou até mesmo substituir o mesmo. O material foi escolhido para avaliar como o acréscimo desse aglomerante pode atuar nas propriedades mecânicas dos tijolos. A cal utilizada no experimento é classificada como CH I – cal hidratada especial (Massical®).

3.1.5 Pó de rocha

Devido à granulometria fina, o pó de rocha é utilizado no concreto por ser de fácil moldagem, além de favorecer um aumento na resistência mecânica da mistura. Menossi *et al*. (2010) sugere o uso de pó de rocha como um material alternativo ou para substituição no uso de areia natural na composição de concreto, principalmente pelo aumento da resistência mecânica dos corpos de prova.

Por isso, optou-se pelo uso desse material no trabalho, pois poderia contribuir na moldagem e melhoria nas propriedades mecânicas dos tijolos confeccionados. O pó de rocha foi adquirido na empresa Pedramix de concretagem no município de Linhares, Espírito Santo. No entanto, é desconhecida a origem do material.

3.1.6 Resíduo de mármore

O resíduo de mármore apresenta um grande impacto sobre o meio ambiente, principalmente pelo descarte, e potencial risco à saúde populacional. O material foi escolhido principalmente para promover uma melhor destinação, evitando maiores impactos ambientais. O resíduo de mármore foi cedido e caracterizado por Aguiar (2011) em sua dissertação de mestrado, sendo fornecido pela empresa Sulcamar do segmento de rochas ornamentais localizada em Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo.

Segundo o autor, o ensaio para análise granulométrica via difração de laser obteve um percentual de 42,67% do resíduo apresentando um tamanho até 0,038 mm. Por fim, após a análise química, o material demonstrou em sua composição química 70,7% de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), 25,6% de carbonato de magnésio ($MgCO_3$), 3,3% de dióxido de sílica (SiO_2), entre outros compostos.

3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO

3.2.1 Caracterização física do solo

Após coleta do solo, a amostra foi previamente peneirada para evitar que materiais orgânicos, como raízes e folhas, pedregulhos espessos e torrões pudessem afetar as propriedades mecânicas e químicas dos tijolos. Para isso, foi utilizado uma peneira de *mesh* 3 1/2" encontrada em lojas de construção civil. Após o peneiramento, três frações do solo foram misturadas manualmente com a cal, pó de rocha e resíduo de mármore separadamente e uma fração contendo apenas o solo foram armazenadas em sacos plásticos.

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização, seguiu-se as normativas da ABNT NBR 6457:2016 (versão corrigida: 2016) e para todos os ensaios foi utilizada uma balança com capacidade de 5 kg e precisão de 0,01 g, da Marte Científica (São Paulo, Brasil). Com isso, os ensaios efetuados foram:

- Análise granulométrica, utilizando o método de peneiramento, seguindo a norma ABNT NBR 7181:2016 (versão corrigida: 2017);
- Massa específica do solo, de acordo com a ABNT NBR 6458:2016 (versão corrigida: 2017) – Anexo B;
- Determinação do limite de liquidez e plasticidade do solo, conforme a ABNT NBR 6459:2016 (versão corrigida: 2017) e ABNT NBR 7180:2016, respectivamente.

3.2.1.1 Análise granulométrica

Para realização da análise granulométrica, foram utilizadas peneiras de abertura de malhas iguais à 50,0 mm, 38,0 mm, 25,4 mm, 19,0 mm, 9,51 mm, 4,75 mm, 2,00 mm, 1,19 mm, 0,595 mm, 0,420 mm, 0,250 mm, 0,149 mm e 0,075 mm, produzidas pela Bertel Indústria Metalúrgica Ltda (São Paulo, Brasil). O ensaio seguiu as diretrizes da norma ABNT NBR 7181:2016 (versão corrigida: 2017).

Em primeiro momento, foi realizado o peneiramento contínuo manual, por meio de agitação das peneiras, sendo coletado o material retido em cada peneira. Para obter o material retido na abertura de malha 0,075 mm, foi utilizada água destilada para facilitar a separação do silte e argila das demais partículas que ficaram retidas na peneira. O processo também foi manual por meio de movimentos giratórios, em posição ligeiramente inclinada com uma mão para não forçar a passagem de elementos com diâmetro igual ou superior à 0,075 mm.

Após o peneiramento e a troca constante de água destilada até a mesma se apresentar incolor, as partículas retidas foram pesadas para obter a massa úmida. Em seguida, os materiais foram levados em estufa à uma temperatura de 105 ºC para coleta da massa seca. Ao término do processo de secagem, as amostras foram novamente pesadas e computados os valores. Para definir a curva granulométrica, as Equações 1, 2 e 3 foram usadas para definir a granulometria das misturas, conforme discutidos nas páginas 37 e 38.

3.2.1.2 Massa específica do solo

Devido à uma baixa quantidade da amostra caracterizada do resíduo de mármore, não foi possível realizar a massa específica para mistura de solo e resíduo de mármore. Por isso, o ensaio de massa específica foi aplicado apenas para o solo puro, objetivando equiparação entre os parâmetros analisados para cada melhoria.

Como preparação para o ensaio, o ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a ABNT NBR 6458:2016 (versão corrigida: 2017) – Anexo B. Inicialmente, o picnômetro foi pesado estando vazio e posteriormente preenchido com água destilada. Posteriormente, o solo foi saturado com água destilada em um outro recipiente e introduzido no mesmo picnômetro.

O recipiente foi preenchido com água destilada até 1 cm abaixo da base do gargalo, e aplicado um vácuo usando uma seringa para garantir a remoção de bolhas de ar. Ao ser pesado novamente, foram coletados todos os valores. Por fim, o valor da massa específica foi obtido pela Equação 11, conforme discutido na página 45.

3.2.1.3 Determinação do limite de liquidez e plasticidade do solo

O ensaio de limite de liquidez foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6459:2016 (versão corrigida: 2017). Para tal, foi utilizado um aparelho Casa Grande manual com contador de golpes, fabricada pela Contenco Indústria e Comércio Ltda (Minas Gerais, Brasil). Primeiramente, as amostras de estudo foram colocadas em um recipiente e hidratadas gradativamente com água destilada, conforme foram amassadas manualmente até formar uma pasta. A Figura 21 representa o material formado.

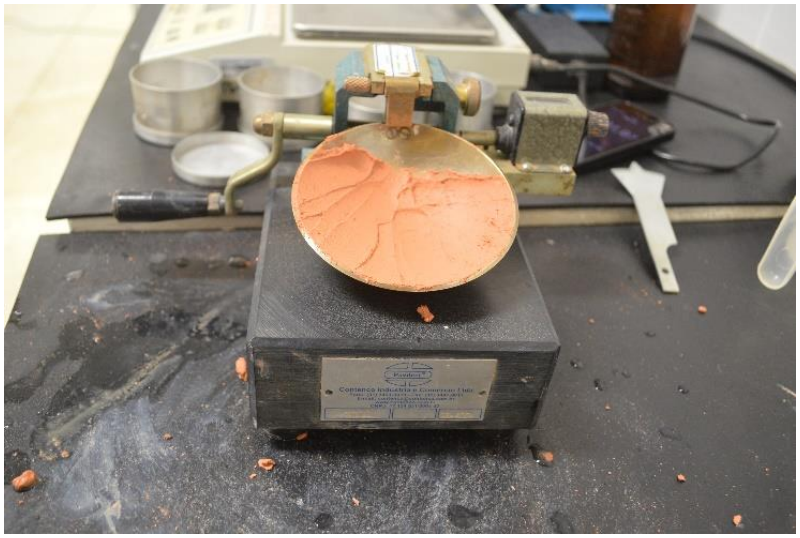
Figura 21 – Pasta formada pela combinação entre solo e água destilada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, uma parte da pasta formada foi transferida para a concha do equipamento, não ultrapassando uma espessura de 10 mm ao ser adicionada. A massa de solo foi dividida em duas partes utilizando um cinzel para aplicar um corte central. Posteriormente, foram aplicados movimentos circular contínuos na manivela da máquina até ocorrer a união das partes separadas.

O toque da concha na base da máquina é definido como golpe. Como procedimento, foram aplicados 35, 30, 25, 20 e 15 golpes, sendo nesta ordem, tolerando-se até dois movimentos posteriores ao número alvo em cada intervalo. Caso o número não fosse atingido, a amostra era removida e novamente amassada e hidratada para repetir o teste. Após obter o número de golpes necessários, a mistura foi removida do aparelho e reintroduzida no recipiente para ser novamente amassada e hidratada para o próximo intervalo até atingir o menor número de golpes. Na Figura 22 é disposta a configuração do ensaio de limite de liquidez.

Figura 22 – Amostra sendo preparada para o ensaio de limite de liquidez.



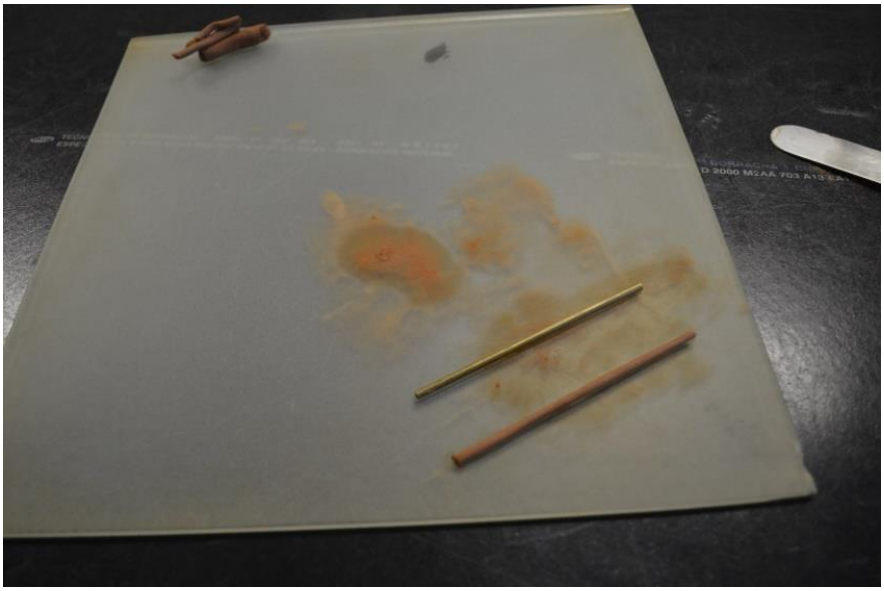
Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada experimento ao atingir o número de golpes foi inserido em uma cápsula metálica e pesado. Adiante, esses materiais foram submetidos ao processo de secagem em estufa à 105 ºC e novamente pesados após um intervalo de dezesseis horas. Finalizando, o limite de liquidez é definido pelo ponto do gráfico onde o teor de umidade corresponde ao valor de 25 golpes.

Por outro lado, o ensaio de plasticidade do solo foi executado segundo os procedimentos da norma ABNT NBR 7180:2016. No primeiro instante, os materiais foram preparados e inseridos em um recipiente de porcelana para serem hidratados e amassados por no mínimo quinze minutos. Como resultado, há a formação de uma pasta, similar à Figura 21.

Tomou-se cerca de 10 g do material para formar uma pequena bola. O objeto produzido foi colocado sobre uma placa de vidro de superfície esmerilhada para ser rolada até produzir um formato cilíndrico (Figura 23). Neste momento, foi colocado um gabarito metálico para referenciar à produção do corpo cilíndrico.

Figura 23 – Ensaio de plasticidade do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras deveriam ter 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, seguindo as dimensões do gabarito. Caso ocorresse à ruptura do corpo durante o processo, a amostra era novamente colocada no recipiente cerâmico e amassada e hidratada repetidamente. Ao atingir às dimensões necessárias, os materiais foram colocados em cápsulas metálicas e pesados em seguida. Após computar os dados, os recipientes foram secados à uma temperatura de 105 ºC em estufa por dezesseis horas.

Os itens foram novamente pesados e os resultados foram obtidos a partir da divisão entre a massa seca e massa úmida, expressão em porcentagem. Por fim, os índices de plasticidade foram calculados de acordo com a Equação 6, conforme apresentada na página 42.

3.2.2 Dosagem das misturas

O presente trabalho objetiva analisar o comportamento mecânico de tijolos solo-cimento confeccionados a partir da adição de diferentes materiais na mistura. Estudos realizados por Holanda e Siqueira (2013), Siqueira *et al*. (2016) e Corrêa *et al*. (2015) apontam aumento na resistência à compressão de tijolos e uma redução na absorção de água com adição de materiais alternativos ao solo,

como *grits* obtidos por meio do processo *Kraft* em indústrias de papel e celulose, resíduo sólido industrial e partículas de bambu. No entanto, os autores obtiveram maiores valores no ensaio de compressão e considerável redução na absorção de água a partir de misturas com menor teor, em torno de 10%, de resíduos adicionados.

Considerando essa informação e uma limitada quantidade de resíduo de mármore caracterizado e fornecido por Aguiar (2011), foi definido um teor de adição em 5% de material alternativo incorporado à massa total de cada mistura de solo. Com isso, foi analisada a influência dessas adições nas propriedades físicas e mecânicas do produto.

Em adição, Pereira, Fazzan e Freitas (2015) obtiveram valores satisfatórios para resistência à compressão com uma adição de 12,5% de cimento na composição. Considerando o processo manual de fabricação dos corpos de prova, é necessário um maior teor de cimento para compensar uma menor compactação dos tijolos se comparado à prensagem hidráulica. Portanto, os corpos de prova foram preparados com um teor de cimento igual a 12,5%. De forma prática, o traço escolhido para fabricar os tijolos foi de 1:8. A Tabela 10 representa a nomenclatura utilizada para cada mistura e sua respectiva composição.

As amostras foram nomeadas de acordo com o teor de cimento e material adicionado a cada mistura, conforme a Tabela 10. A amostra contendo solo e cimento foi nomeada como MS. Em adição, a amostra contendo solo, cal e cimento foi denominada como MC, seguida da amostra de solo, pó de rocha e cimento como MB. Por fim, a amostra de solo, resíduo de mármore e cimento foi nomeada de MM.

Tabela 10 – Amostras e suas respectivas composições.

Amostra	Teor da mistura	Teor de cimento
MS	100% de solo	12,5%
MC	95 % de solo + 5% de cal hidratada	12,5%
MB	95 % de solo + 5% de pó de rocha	12,5%
MM	95 % de solo + 5% de resíduo de mármore	12,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Fabricação dos tijolos

Após o peneiramento e caracterização do solo, foram preparadas quatro amostras a serem utilizadas na fabricação dos tijolos. As quantidades para cada material a ser incorporada na mistura foram pesadas e adicionadas considerando suas respectivas dosagens. Para o processo de fabricação, a norma ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013) foi utilizada como referência aos procedimentos adotados.

Em primeiro momento, as amostras foram homogeneizadas com auxílio de uma enxada. Em seguida, o processo foi repetido para a adição de cimento até atingir uma coloração uniforme do material. Aos poucos, a mistura foi hidratada com água, até atingir uma consistência inicial para prensagem, conforme Figura 24.

Figura 24 – Mistura sendo homogeneizada e hidratada durante o preparo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar a quantidade necessária de água adicionada, foi utilizado um método englobando uma forma visual e manual, para avaliar a consistência suficiente para moldagem. Em primeiro momento, foi coletado uma pequena quantidade da amostra com a mão e após pressionar a mesma com a mão fechada, a porção deve destacar os formatos dos dedos, como mostrada na Figura 25. Ademais, a amostragem foi largada de uma altura aproximada de um metro até atingir o solo, desfragmentando ao tocar o mesmo. Caso isto não ocorra, a mistura se apresenta muito úmida.

Figura 25 – Verificação de consistência da mistura.

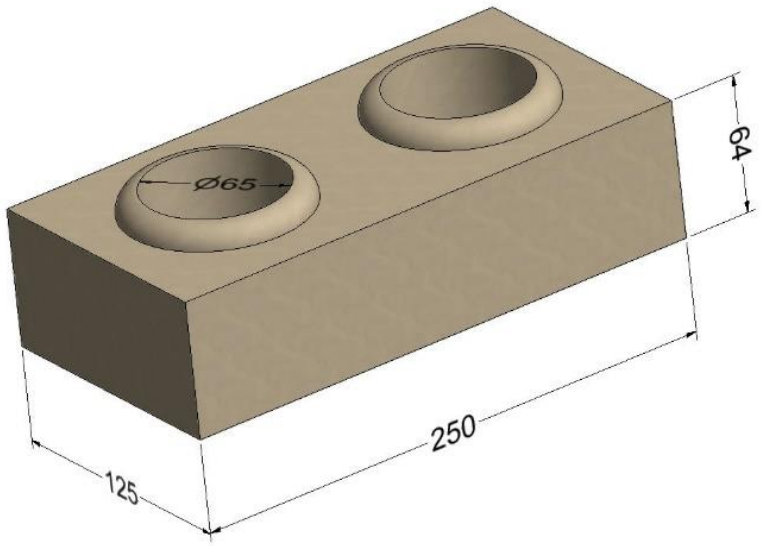
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o processo de moldagem dos tijolos solo-cimento, foi utilizado uma prensa manual (Figura 26) fabricada pela empresa Verde Equipamentos (São Paulo, Brasil). Cada ciclo de prensagem possibilita a fabricação de uma unidade de tijolo vazado. As dimensões dos tijolos fabricados são representadas pela Figura 27.

Figura 26 – Prensa manual.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Dimensões em mm do tijolo solo-cimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a mistura atingir uma consistência aparente, seguindo o método anterior, a massa foi transferida para o recipiente dosador do equipamento para em seguida ser adicionado no molde da máquina. O molde da prensa possui medidas de largura e comprimento estabelecidas (Figura 28), conferindo o formato do produto.

Figura 28 – Amostra adicionada ao molde.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após aplicação de uma força manual na haste metálica, os tijolos foram cuidadosamente retirados da matriz e assim, armazenados sobre um palete de madeira posicionado em um local sombreado, conforme Figura 29.

Figura 29 – Tijolos posicionados sobre palete de madeira após fabricação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras foram umedecidas após seis horas da moldagem. Posterior a isso, as amostras foram cobertas por lona para evitar a perda de umidade para o ambiente e assim, evitar possíveis avarias no produto. Esta medida é necessária para garantir uma melhor reação química do cimento na mistura. A cura dos

tijolos ocorreu durante um período de sete dias, promovendo hidratação por três vezes ao dia no decorrer do tempo estipulado, como ilustrada na Figura 30.

Figura 30 – Hidratação dos tijolos após a fabricação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o intervalo de sete dias, os tijolos permaneceram cobertos e não foram molhados até atingirem o espaço de vinte e oito dias após fabricados. Esta medida foi adotada considerando obter uma maior resistência mecânica do cimento, melhorando também as propriedades dos experimentos.

Para cada composição foram confeccionados doze tijolos, utilizado apenas dez para os ensaios. Deste número, todos os experimentos foram submetidos ao ensaio dimensional pelo uso de um paquímetro universal de 300 mm, com resolução de 0,05 mm, fabricado pela empresa Mitutoyo (São Paulo, Brasil). Do total, sete corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples e os outros três ao ensaio de absorção de água. No entanto, para a mistura do solo, pó de rocha e cimento foram utilizadas apenas nove amostras, sendo seis destas para ensaio de resistência à compressão e as outras três para o ensaio de absorção de água.

Como justificativa, essa composição apresentou uma maior necessidade de aplicação de força manual para compactação durante a moldagem e por isso, pode não ter ocorrido uma correta compactação no decorrer do processo. Como consequência, três amostras apresentaram propagação de trincas durante à cura, ocasionando o rompimento desses tijolos. A Tabela 11 apresenta a quantidade de corpos de prova utilizados para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

Tabela 11 – Relação da quantidade de corpos de prova para cada ensaio.

Amostra	Resistência à compressão simples	Absorção de água
MS	7	3
MC	7	3
MB	6	3
MM	7	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A preparação e execução dos experimentos para o ensaio de compressão simples foram seguidas a partir das diretrizes da norma ABNT NBR 8492:2012 (versão corrigida: 2013). Após o período de vinte e oito dias, os tijolos selecionados para o ensaio foram inicialmente seccionados ao centro perpendicularmente à maior dimensão, conforme Figura 31. Considerando a ausência de uma serra de maior porte no IFES – Campus São Mateus, foi utilizado uma serra circular elétrica, utilizando um disco diamantado para porcelanato com diâmetro de 110 mm.

Figura 31 – Corte dos tijolos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao disco não apresentar um diâmetro suficiente para corte total da peça, foram aplicados cortes nas faces superior e inferior até promover o desmembramento do tijolo. Com isso, o corte aplicado não se mostrou predominantemente linear durante a desunião das faces, como representado pela Figura 32.

Figura 32 – Tijolo cortado com serra diamantada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, foi executado o capeamento das faces superior, intermédia e inferior. Como metodologia, foi fabricada uma argamassa a partir da mistura entre cimento Portland CP V- ARI, areia lavada fina e água. Para isso, foi aplicado uma parte de cimento para duas partes de areia, atingindo a proporção de 1:2. Durante a preparação das amostras, cada face (Figura 33) a ser revestida com a argamassa foi imersa em água por pelo menos uma hora, a fim de evitar a perda de água presente na mistura para o tijolo.

Figura 33 – Preparação do experimento para receber a camada de argamassa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

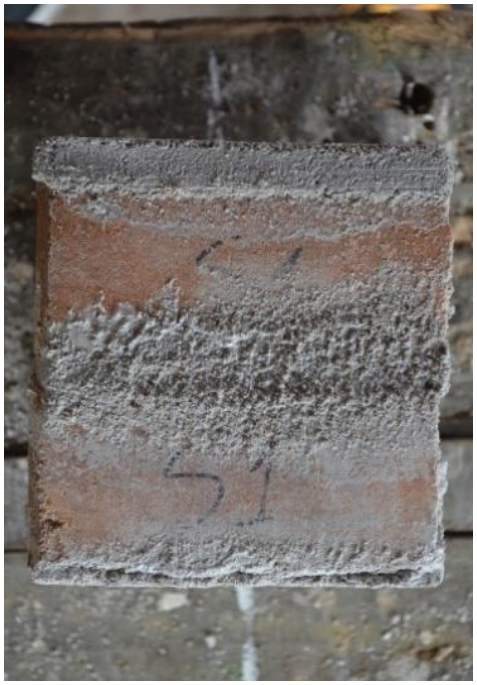
Após a hidratação, utilizou-se folhas de jornais umedecidas sobre superfície plana de apoio para aplicar a argamassa nas faces dos tijolos (Figura 34). Esta ação também tem por finalidade evitar a perda de água para os meios de contato direto. Primeiro, foi aplicado utilizando uma espátula para construção na face central do corpo de prova, e em seguida as faces superiores e inferiores.

Figura 34 – Tijolos sendo capeados por argamassa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada aplicação de argamassa, foram aplicados doze horas de secagem ao ar livre para promover o endurecimento do material. Ao término dessa etapa, os corpos de prova apresentaram faces planas como representada na Figura 35.

Figura 35 – Amostras com faces planas com uso de argamassa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo a preparação do ensaio, os tijolos foram imersos em água durante seis horas que antecedem o ensaio de compressão, conforme Figura 36.

Figura 36 – Corpos de prova imersos em água.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao término do período de hidratação, cada amostra foi retirada do tanque apenas na ocasião do seu respectivo ensaio, sendo enxugado por um pano levemente umedecido para evitar excesso de líquido na amostra. O ensaio foi realizado em um período de até três minutos após retirada do tanque.

Para execução do ensaio, foi utilizado uma máquina de ensaio universal com capacidade máxima de 200 kN, modelo WDW-200E da TIME Group Inc. (Figura 37). Inicialmente, foi inserido uma chapa de ferro fundido sobre a face superior do corpo de prova para garantir uma maior uniformidade na aplicação da força de compressão. Além disso, foram dispostas folhas de jornais abaixo da face inferior apenas para facilitar à limpeza da máquina após cada ensaio.

Figura 37 – Máquina de ensaio universal configurada para o ensaio de compressão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o ensaio, os corpos de prova foram submetidos a uma carga uniforme, sendo elevada gradativamente até ocasionar a ruptura do corpo de prova. Após a ruptura (Figura 38), o ensaio era interrompido e a máquina novamente preparada para o experimento posterior. Os dados obtidos durante os ensaios foram computados e armazenados pelo *software WinWDW Control* disponibilizado pelo fabricante da máquina universal.

Figura 38 – Corpo de prova após ruptura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, os valores individuais de resistência à compressão simples foram determinados pela divisão entre a carga máxima durante o ensaio e a área da face submetida ao esforço, conforme a Equação 13 apresentada na página 53. O valor de resistência à compressão simples, para cada mistura, foi estabelecido por meio da média aritmética dos valores individuais dos corpos de prova.

3.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção de água foi realizado no IFES – Campus Nova Venécia, seguindo os procedimentos da ABNT NBR 8492:2012. Preliminarmente, os tijolos solo-cimento foram inseridos em uma estufa para secagem.

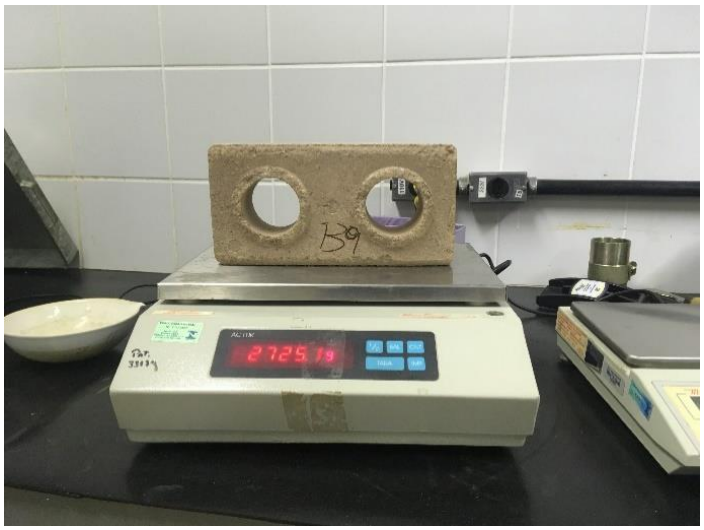
Em seguida, os experimentos permaneceram durante vinte e quatro horas à uma temperatura constante no intervalo entre 105 a 110 ºC para atingir o valor referente a massa seca de cada amostra, devido à perda de umidade durante o processo, conforme Figura 39. Ao término do período, os tijolos foram pesados em uma balança de precisão com capacidade de 10 kg e precisão de 0,1 g, da Marte Científica.

Figura 39 – Amostras submetidas à secagem para o ensaio de absorção de água.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, os tijolos foram totalmente imersos em um tanque com água fornecida pela empresa de saneamento do município de Nova Venécia, Espírito Santo, durante um período de vinte e quatro horas. Ao concluir este período, as amostras foram coletadas e secadas superficialmente por um pano levemente umedecido. Cada amostra foi pesada e computado o valor referente a massa saturada individual, como mostra a Figura 40.

Figura 40 – Pesagem da amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor de absorção de água individual, representado em porcentagem, foi determinado por meio da Equação 14, conforme discutida na página 54. Para obter o valor médio para a mistura, foi realizada uma média aritmética entre os valores individuais calculados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente estudo avaliou tijolos solo-cimento fabricados com adição de pó de rocha, cal hidratada e pó de mármore, seguindo a norma ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013). A partir da confecção dos corpos de prova, os resultados para determinar as propriedades físicas e mecânicas foram apresentados e discutidos neste capítulo, conforme a metodologia definida nesse estudo.

A partir da metodologia aplicada, as amostras foram nomeadas de acordo com o teor de cimento e material adicionado a cada mistura, conforme a Tabela 10. A amostra contendo solo e cimento foi nomeada como MS. Em adição, a amostra contendo solo, cal e cimento foi denominada como MC, seguida da amostra de solo, pó de rocha e cimento como MB. Por fim, a amostra de solo, resíduo de mármore e cimento foi nomeada de MM.

Tabela 10 – Amostras e suas respectivas composições.

Amostra	Teor da mistura	Teor de cimento
MS	100% de solo	12,5%
MC	95% de solo + 5% de cal hidratada	12,5%
MB	95 % de solo + 5% de pó de rocha	12,5%
MM	95 % de solo + 5% de resíduo de mármore	12,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS

De acordo com a norma ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013), o solo deve atender às seguintes características:

a) 100% de material que passa na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010;
b) 10% a 50% de material que passa na peneira com abertura de malha 0,075 mm, de acordo com a ABNT NBR ISO 3310-1:2010;
c) Limite de liquidez menor ou igual a 45%;
d) Índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

4.1.1 Massa específica

A determinação da massa específica do solo descreve o estado estrutural do solo, ou seja, a presença de vazios em sua estrutura interna. Inicialmente, foi calculado o teor de umidade da amostra, sendo representada pela Tabela 12.

Tabela 12 – Determinação do teor de umidade da amostra MS.

CÁPSULA	20	52	162
Massa da cápsula (g)	15,52	14,25	14,30
Massa bruta úmida (g)	62,58	64,51	62,27
Massa bruta seca (g)	59,29	61,09	59,05
Massa de água (g)	3,29	3,42	3,22
Umidade (%)	7,517	7,301	7,196
Umidade média (%)		7,34	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, a Tabela 13 apresenta a determinação da massa específica.

Tabela 13 – Determinação da massa específica de MS.

AMOSTRA	DETERMINAÇÃO 1	DETERMINAÇÃO 2
Massa do solo úmido (g)	63,05	63,23
Massa do balão + solo + água (g)	708,04	720,70
Massa do balão cheio e água (g)	671,40	684,00
Temperatura de ensaio (°C)	26	26
Massa específica da água à temperatura do ensaio (g/cm³)	0,9968	0,9968
Massa específica dos grãos de solo (g/cm³)	2,382	2,376

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados, foi possível obter a média das massas calculadas das duas amostragens, determinando a massa específica do solo. Logo, esse valor calculado foi de 2,379 g/cm³.

4.1.2 Ensaio granulométrico

Para a análise de granulometria dos experimentos, as Tabelas 14, 15, 16 e 17 apresentam os valores obtidos nos peneiramentos fino e grosso das amostras de MS, MC, MB e MM, respectivamente.

Tabela 14 – Peneiramento da amostra de MS.

ABERTURA (mm)	MATERIAL PASSANTE (%)	MATERIAL PASSANTE (g)	MATERIAL RETIDO (%)	MATERIAL RETIDO (g)
50,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
38,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
25,4	100,00	1000,2	0,00	0,00
19,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
9,51	100,00	1000,2	0,00	0,00
4,75	100,00	1000,2	0,00	0,00
2,00	93,63	936,53	6,37	63,67
1,19	91,43	110,96	8,57	9,77
0,595	77,78	95,39	22,22	15,57
0,420	70,19	86,73	29,81	8,66
0,250	59,60	74,66	40,40	12,07
0,149	51,65	65,59	48,35	9,07
0,075	46,34	59,53	53,66	6,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Peneiramento da amostra de MC.

ABERTURA (mm)	MATERIAL PASSANTE (%)	MATERIAL PASSANTE (g)	MATERIAL RETIDO (%)	MATERIAL RETIDO (g)
50,0	100,00	1000,4	0,00	0,00
38,0	100,00	1000,4	0,00	0,00
25,4	100,00	1000,4	0,00	0,00
19,0	100,00	1000,4	0,00	0,00
9,51	100,00	1000,4	0,00	0,00
4,75	100,00	1000,4	0,00	0,00
2,00	93,84	938,81	6,16	61,59
1,19	90,60	109,60	9,40	10,58
0,595	75,31	92,39	24,69	17,21
0,420	68,21	84,40	31,79	7,99
0,250	58,05	72,97	41,95	11,43
0,149	52,06	66,23	47,94	6,74
0,075	48,02	61,68	51,98	4,55

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Peneiramento da amostra de MB.

ABERTURA (mm)	MATERIAL PASSANTE (%)	MATERIAL PASSANTE (g)	MATERIAL RETIDO (%)	MATERIAL RETIDO (g)
50,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
38,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
25,4	100,00	1000,2	0,00	0,00
19,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
9,51	100,00	1000,2	0,00	0,00
4,75	100,00	1000,2	0,00	0,00
2,00	94,33	943,33	5,67	56,67
1,19	90,41	109,29	9,59	10,73
0,595	76,10	93,28	23,90	16,01
0,420	68,64	84,94	31,36	8,34
0,250	56,80	71,69	43,20	13,25
0,149	48,88	62,83	51,12	8,86
0,075	42,99	56,24	57,01	6,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

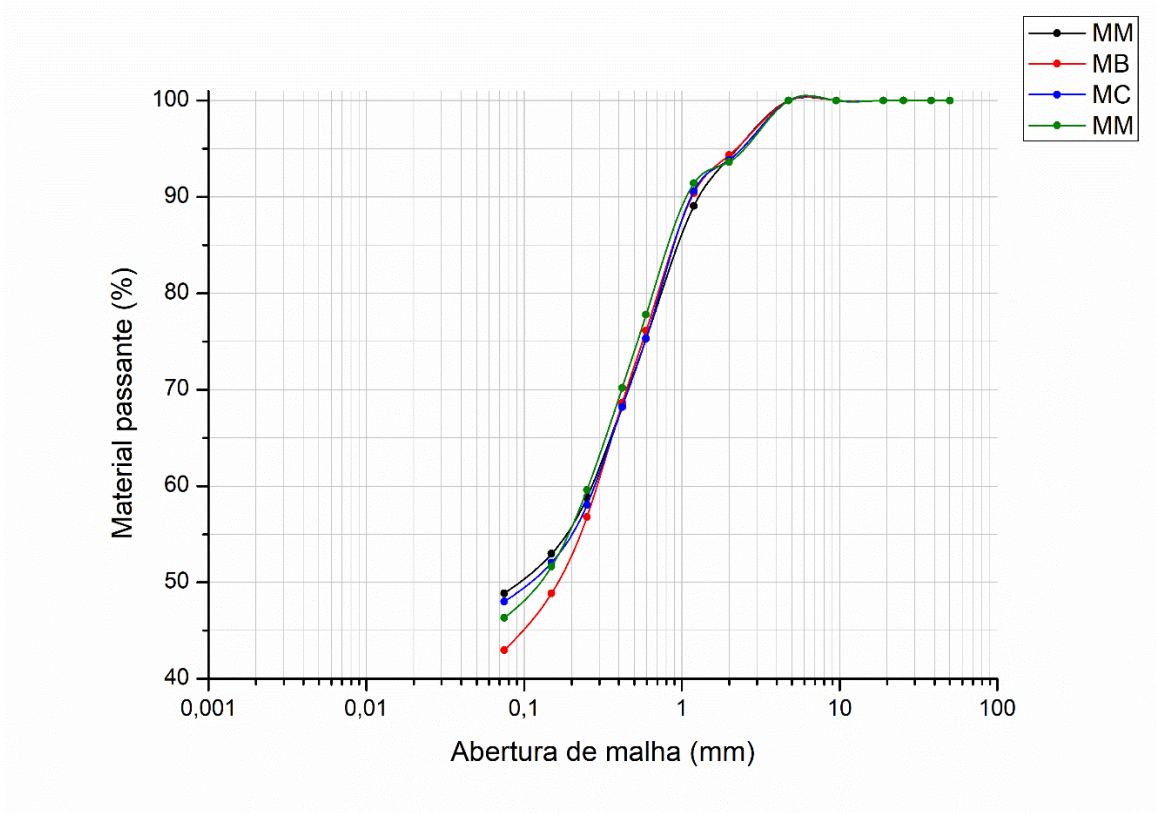
Tabela 17 – Peneiramento da amostra de MM.

ABERTURA (mm)	MATERIAL PASSANTE (%)	MATERIAL PASSANTE (g)	MATERIAL RETIDO (%)	MATERIAL RETIDO (g)
50,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
38,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
25,4	100,00	1000,2	0,00	0,00
19,0	100,00	1000,2	0,00	0,00
9,51	100,00	1000,2	0,00	0,00
4,75	100,00	1000,2	0,00	0,00
2,00	94,07	940,83	5,93	59,27
1,19	89,06	107,77	10,94	12,63
0,595	75,29	91,87	24,71	15,90
0,420	68,39	83,90	31,61	7,97
0,250	58,79	72,82	41,21	11,08
0,149	52,97	66,10	47,03	6,72
0,075	48,88	61,37	51,12	4,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os resultados do peneiramento, foi possível elaborar a Figura 41 com curvas granulométricas para as amostras de MS, MC, MB e MM.

Figura 41 – Curva granulométrica das amostras de MS, MC, MB e MM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a ABNT NBR 6502:1995, as seguintes classificações para cada diâmetro de partícula são mostradas na Tabela 18.

Tabela 18 – Classificação granulométrica.

Classificação	Diâmetro
Pedregulho	entre 60,0 mm e 2,0 mm
Areia	entre 2,0 mm e 0,06 mm
Silte	entre 0,06 mm e 0,002 mm
Argila	menor que 0,002 mm

Fonte: ABNT NBR 6502:1995.

A partir da Tabela 18, o solo apresenta uma característica predominantemente arenosa. Este aspecto é recomendado para a fabricação de tijolos solo-cimento conforme Souza, Segantini e Pereira (2008). Todos os experimentos tiveram

100% de material passante na peneira de 4,75 mm. Além disso, o peneiramento com abertura de malha de 0,075 mm obteve percentuais iguais a 46,34%, 48,02%, 42,99% e 48,88% de material passante nas amostras de MS, MC, MB e MM, respectivamente. Portanto, todas as amostras possuem granulometria satisfatória para moldagem de tijolos, segundo ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013).

Os resultados apresentados demonstram um aumento no percentual de partículas passantes na peneira de 0,075 mm para os experimentos contendo cal e resíduo de mármore se comparado ao solo puro. O resíduo de mármore evidencia o maior percentual de partículas menores que o diâmetro em questão, apresentando um valor de 48,88% de sua composição. Essas partículas são requeridas por permitirem coesão durante o processo de fabricação, promovendo melhora para moldagem de tijolos.

4.1.3 Ensaio de limite de consistência

Para obter o limite de liquidez (LL), foi considerado o valor percentual equivalente à 25 golpes. Para isso, foram tomados cinco resultados presentes nas Tabelas 19, 20 e 21, referentes as amostras MS, MB e MM, nesta ordem. Para a mistura com cal não foi possível obter o limite de liquidez e plasticidade, devido à sua característica de aglomerante hidráulico, endurecendo o solo rapidamente ao ser hidratado.

Tabela 19 – Ensaio de limite de liquidez para amostra MS.

Cápsula	132	104	99	172	144
Golpes	34	30	25	20	17
Tara (g)	14,05	14,77	14,42	13,73	14,22
Tara + Massa úmida (g)	26,82	28,38	29,41	29,69	29,24
Tara + Massa seca (g)	22,98	24,08	24,46	24,31	23,44
Massa seca (g)	8,93	9,31	10,04	10,58	9,22
Massa de água (g)	3,84	4,30	4,95	5,38	5,80
Umidade (%)	43,00	46,19	49,30	50,85	62,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Ensaio de limite de liquidez para amostra MB.

Cápsula	102	158	171	122	51
Golpes	34	31	23	18	15
Tara (g)	14,16	14,38	13,94	14,41	14,38
Tara + Massa úmida (g)	31,10	30,23	29,08	31,12	29,24
Tara + Massa seca (g)	26,67	25,78	24,46	25,87	24,47
Massa seca (g)	12,51	11,40	10,52	11,46	10,09
Massa de água (g)	4,43	4,45	4,62	5,25	4,77
Umidade (%)	35,41	39,04	43,92	45,81	47,27

Fonte: Elaborado pelo autor.

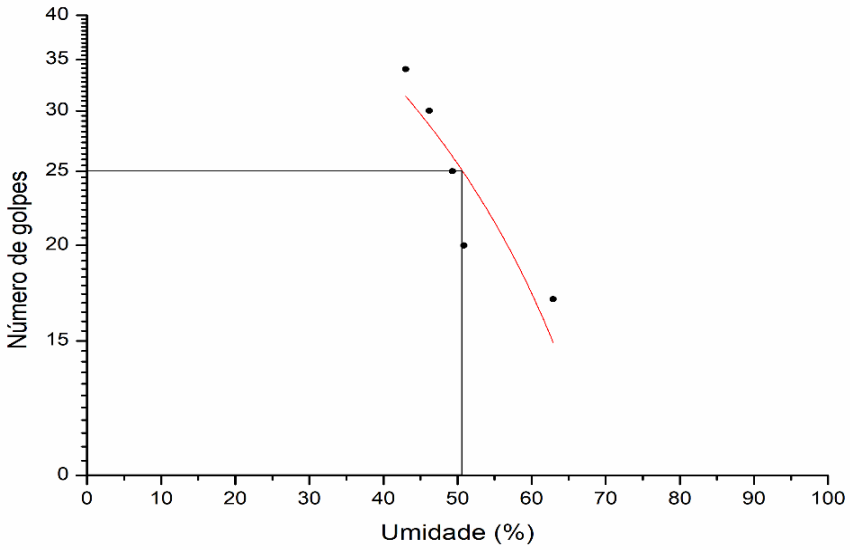
Tabela 21 – Ensaio de limite de liquidez para amostra MM.

Cápsula	179	111	64	15	85
Golpes	37	32	27	22	17
Tara (g)	13,97	14,17	14,75	13,93	14,35
Tara + Massa úmida (g)	30,76	32,89	31,70	33,00	29,16
Tara + Massa seca (g)	26,73	28,28	27,35	27,35	24,96
Massa seca (g)	12,76	14,11	12,60	13,42	10,61
Massa de água (g)	4,03	4,61	4,35	5,65	4,20
Umidade (%)	31,58	32,67	34,52	42,10	39,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

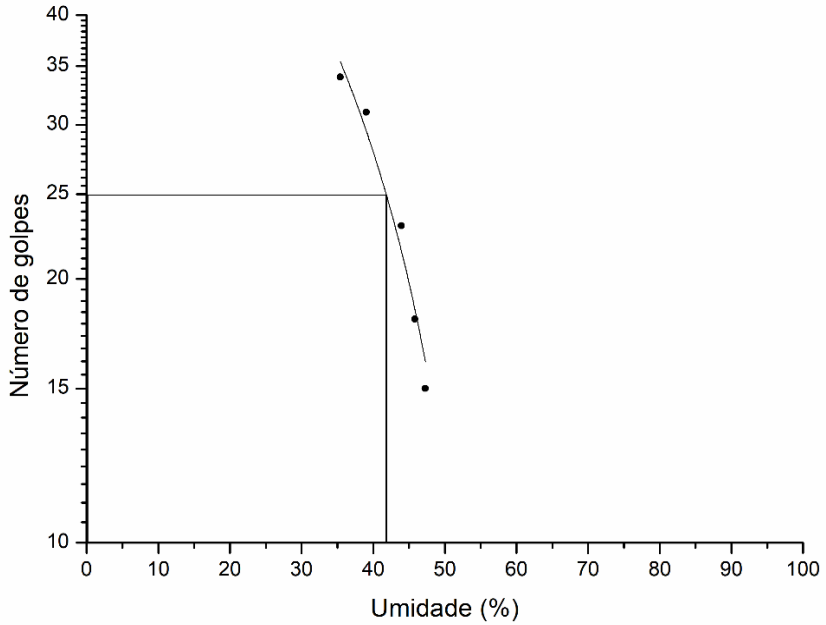
Considerando os valores obtidos, foi possível traçar retas e obter o valor equivalente à 25 golpes de acordo com as Figuras 42, 43 e 44, representando os valores para MS, MB e MM, respectivamente.

Figura 42 – Limite de liquidez equivalente à 25 golpes para MS.



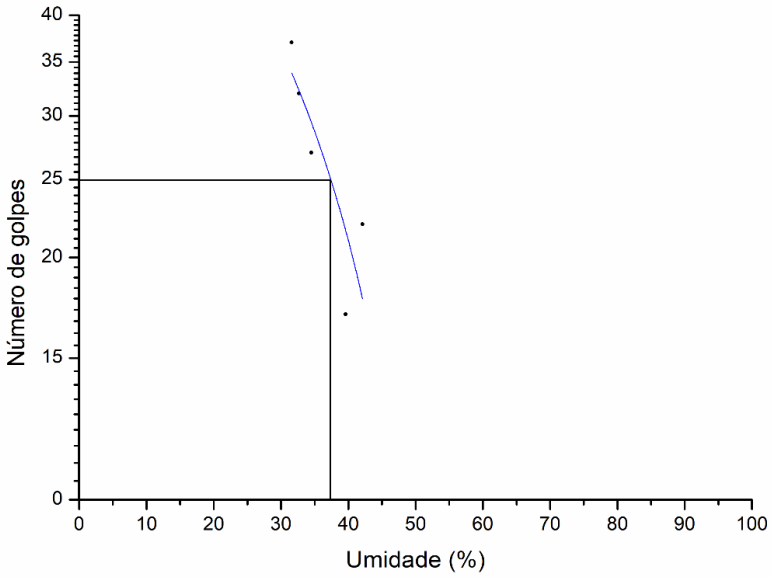
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 – Limite de liquidez equivalente à 25 golpes para MB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Limite de liquidez equivalente à 25 golpes para MM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, foi realizado o ensaio de limite de plasticidade (LP). Para isso, foram tomadas cincos amostras para cada experimento e obtido o valor médio de plasticidade entre os resultados. O limite de plasticidade foi obtido pelo valor médio de três resultados que não diferiram em 5% da média calculada inicialmente. Os resultados dos ensaios foram representados pelas Tabelas 22, 23 e 24 das amostras MS, MB e MM, respectivamente. Por fim, o índice de plasticidade (IP) foi obtido a partir da diferença entre LL e LP.

Tabela 22 – Ensaio de limite de plasticidade para amostra MS.

Cápsula	48	52	78	165	167
Tara (g)	13,89	14,23	14,02	14,34	13,66
Tara + Massa úmida (g)	15,61	16,00	15,71	16,94	15,03
Tara + Massa seca (g)	15,23	15,56	15,30	16,34	14,70
Massa seca (g)	1,34	1,33	1,28	2,00	1,04
Massa de água (g)	0,38	0,44	0,41	0,60	0,33
Umidade (%)	28,36	33,08	32,03	30,00	31,73
Média (%)					31,04
Desvio padrão					1,86
Limite de plasticidade (%)					31,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Ensaio de limite de plasticidade para amostra MB.

Cápsula	70	89	93	151	173
Tara (g)	14,41	12,90	13,92	14,42	14,06
Tara + Massa úmida (g)	16,10	14,64	15,78	15,98	16,35
Tara + Massa seca (g)	15,76	14,31	15,41	15,61	15,89
Massa seca (g)	1,35	1,41	1,49	1,19	1,83
Massa de água (g)	0,34	0,33	0,37	0,37	0,46
Umidade (%)	25,19	23,40	24,83	31,09	25,14
Média (%)					25,93
Desvio padrão					2,98
Limite de plasticidade (%)					25,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Ensaio de limite de plasticidade para amostra MM.

Cápsula	7	14	37	113	125
Tara (g)	15,40	14,30	13,48	14,74	13,57
Tara + Massa úmida (g)	16,89	15,84	15,26	16,60	15,24
Tara + Massa seca (g)	16,63	15,55	14,95	16,28	14,92
Massa seca (g)	1,23	1,25	1,47	1,54	1,35
Massa de água (g)	0,26	0,29	0,31	0,32	0,32
Umidade (%)	21,14	23,20	21,09	20,78	23,70
Média (%)					21,98
Desvio padrão					1,36
Limite de plasticidade (%)					21,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos, a Tabela 25 representa os valores obtidos para os limites de liquidez e plasticidade para cada experimento.

Tabela 25 – Limites de liquidez e plasticidade para cada amostra.

Amostra	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
MS	50,69	31,25	19,44
MC	-	-	-
MB	41,80	25,05	16,75
MM	37,06	21,00	16,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013), o limite de liquidez deve ser menor ou igual a 45% e índice de plasticidade menor ou igual a 18%. Os resultados apresentados na Tabela 25 determinam que apenas as amostras de MB e MM estão em conformidade com a norma.

O experimento contendo apenas o solo se mostrou acima do valor máximo permitido em norma. Portanto, é necessário a adição de materiais para corrigir o solo, a exemplo da areia, mesmo que o solo apresente característica arenosa, exigindo maiores percentuais de cimento adicionado para estabilizarem a mistura. Os acréscimos de pó de rocha e resíduo de mármore apresentaram resultados satisfatórios como materiais de correção para um excesso de argila na composição do solo.

Esses resultados estão de acordo com o estudo de Souza, Segantini e Pereira (2008), cujo autores reduziram o índice de plasticidade do experimento de 9,1% para 5,8% ao aumentarem a porcentagem de resíduo de concreto incorporado ao tijolo solo-cimento. Pinheiros *et al.* (2013) também atingiram menores percentuais para IP, reduzindo de 15% a 6%, ao adicionarem um maior percentual de *grits*, cujo resíduo sólido é gerado a partir do processo *Kraft* em indústrias de celulose e papel.

4.1.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Para cada amostra, foram preparados doze corpos de prova para que dez destes fossem submetidos aos ensaios definidos. No entanto, três tijolos de MB apresentaram propagação de trincas durante o período de cura e ocorreu o rompimento dos tijolos. Por isso, foram considerados apenas nove corpos de prova no total, sendo seis amostras submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples e três amostras para ensaio de absorção de água, conforme a Tabela 11.

Inicialmente, uma análise dimensional foi aplicada, por meio do uso de paquímetro, em todas as amostras usadas para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Para isso, foram escolhidos três pontos

distintos em cada medida e foi calculada a média entre os valores para cada face. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 26, 27, 28 e 29.

Tabela 26 – Análise dimensional dos corpos de prova de MS.

Corpo de prova	Comprimento médio (mm)	Largura média (mm)	Altura média (mm)
1	250,68	125,10	64,37
2	250,63	124,97	65,47
3	250,80	125,03	65,72
4	250,87	125,10	65,50
5	250,58	125,07	65,07
6	250,67	125,00	65,43
7	250,72	125,00	64,55
8	250,58	125,00	65,53
9	250,47	125,00	64,37
10	250,57	125,00	64,32
Média total	250,66	125,03	65,03
Desvio padrão	0,12	0,05	0,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27 – Análise dimensional dos corpos de prova de MC.

Corpo de prova	Comprimento médio (mm)	Largura média (mm)	Altura média (mm)
1	251,08	125,07	64,00
2	251,27	125,25	65,53
3	251,08	125,22	65,63
4	251,13	125,37	63,93
5	251,17	125,37	64,20
6	251,12	125,17	65,38
7	251,22	125,32	64,00
8	251,17	125,33	63,97
9	251,33	125,60	64,17
10	251,57	125,48	65,57
Média total	251,21	125,32	64,64
Desvio padrão	0,15	0,15	0,77

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 – Análise dimensional dos corpos de prova de MB.

Corpo de prova	Comprimento médio (mm)	Largura média (mm)	Altura média (mm)
1	250,57	125,07	66,03
2	250,50	125,00	64,80
3	250,77	125,17	66,00
4	250,63	125,17	64,70
5	250,57	125,00	66,03
6	250,77	125,13	66,00
7	250,62	125,18	64,65
8	250,98	125,25	66,00
9	250,73	125,00	64,60
Média total	250,68	125,11	65,42
Desvio padrão	0,15	0,09	0,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 – Análise dimensional dos corpos de prova de MM.

Corpo de prova	Comprimento médio (mm)	Largura média (mm)	Altura média (mm)
1	250,70	125,27	66,33
2	250,60	125,25	69,73
3	250,60	125,23	64,20
4	250,70	125,10	64,97
5	250,50	125,00	65,27
6	250,50	125,17	64,63
7	250,80	125,22	70,05
8	250,60	125,23	66,28
9	250,80	125,10	65,77
10	250,80	125,23	66,73
Média total	250,66	125,18	66,40
Desvio padrão	0,12	0,09	2,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os dados apresentados, a norma ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013) determina a dimensão nominal como 240 mm x 120 mm x 70 mm, representando o comprimento, largura e altura, respectivamente. No entanto, os tijolos podem apresentar dimensões diferentes da nominal, desde que o valor para altura seja inferior ao valor da largura. Vale ressaltar que a altura é a face que mais ocorre alterações, pois este tamanho é influenciado pela força

aplicada durante à prensagem. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a Figura 27.

Posteriormente, sete corpos de prova das amostras de MS, MC e MM e seis corpos de prova do experimento de MB foram submetidos ao ensaio de compressão simples. De acordo com a norma ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013), os corpos de prova não devem apresentar uma média de valores para o ensaio de compressão inferior a 2,0 MPa e nem valor individual inferior a 1,7 MPa.

Figura 45 – Corpo de prova rompido após ensaio de resistência à compressão simples.

Fonte: Elaborado pelo autor.

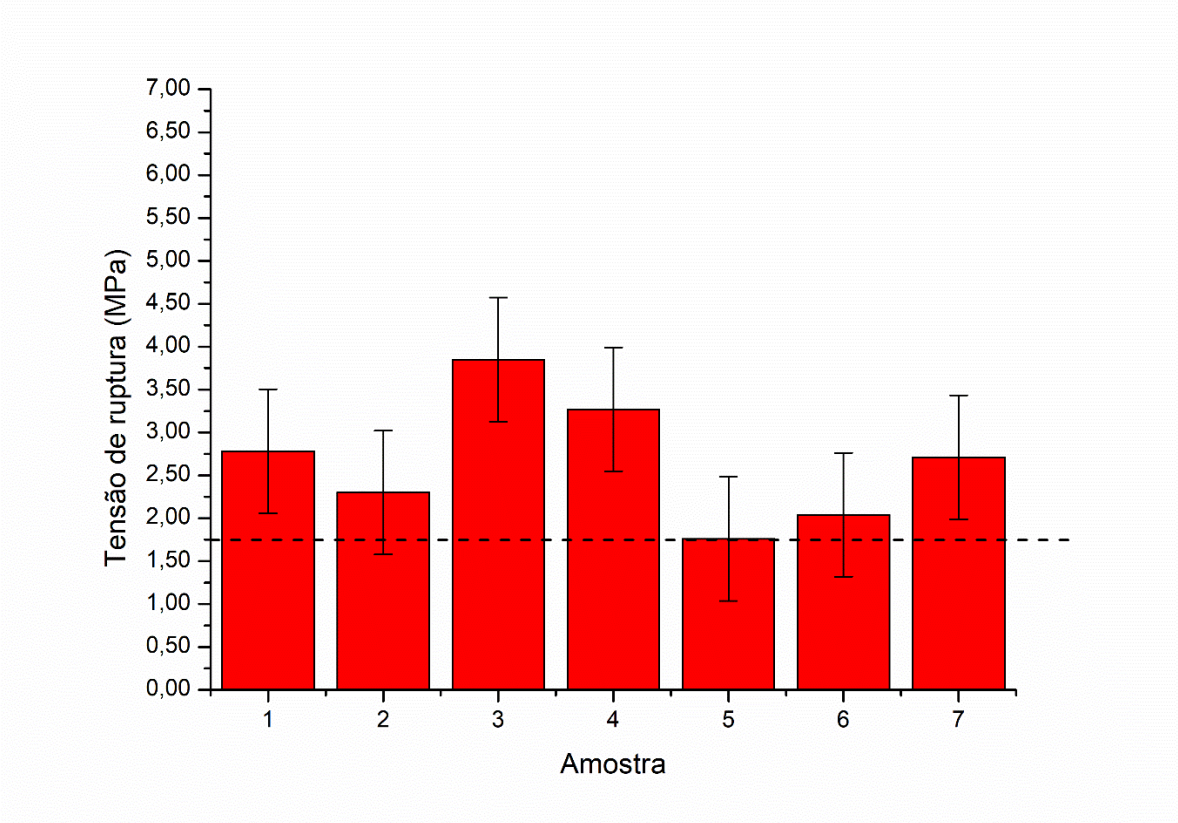
Os resultados obtidos são representados pelas Tabelas 30, 31, 32 e 33. Em adição, as Figuras 46, 47, 48 e 49 que ilustram os resultados obtidos para cada amostra, considerando uma linha tracejada referente ao valor mínimo individual definido pela norma.

Tabela 30 – Ensaio de resistência à compressão simples para MS.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (MPa)
1	43640	15680,24	2,78
2	36024	15660,41	2,30
3	60440	15679,18	3,85
4	51340	15691,71	3,27
5	27504	15669,81	1,76
6	32016	15666,67	2,04
7	42480	15669,79	2,71
	Média total		2,67
	Desvio padrão		0,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples de MS.



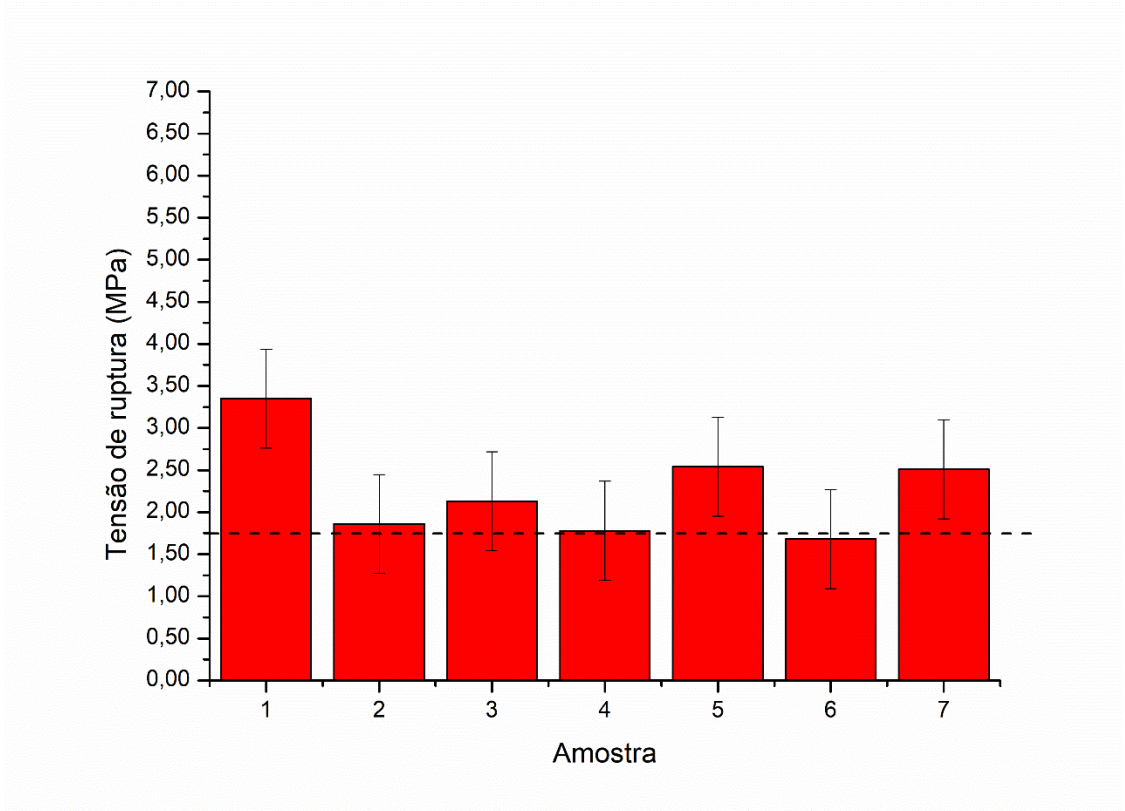
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Ensaio de resistência à compressão simples para MC.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (MPa)
1	52640	15701,08	3,35
2	29280	15735,58	1,86
3	33560	15719,91	2,13
4	28032	15741,87	1,78
5	39920	15743,96	2,54
6	26376	15715,72	1,68
7	39500	15740,82	2,51
	Média total		2,36
	Desvio padrão		0,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples de MC.



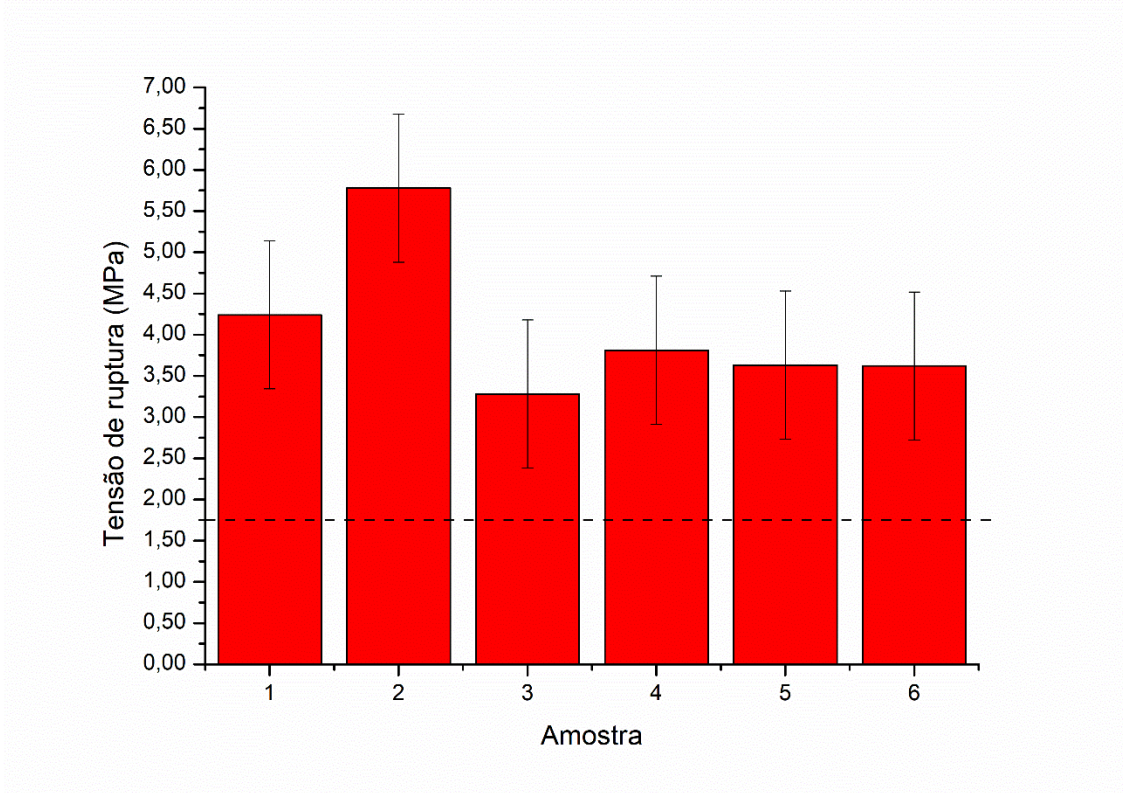
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 – Ensaio de resistência à compressão simples para MB.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (MPa)
1	66460	15668,77	4,24
2	90480	15656,25	5,78
3	51400	15693,81	3,28
4	59740	15685,47	3,81
5	56780	15660,42	3,63
6	56800	15689,63	3,62
	Média total		4,06
	Desvio padrão		0,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples de MB.



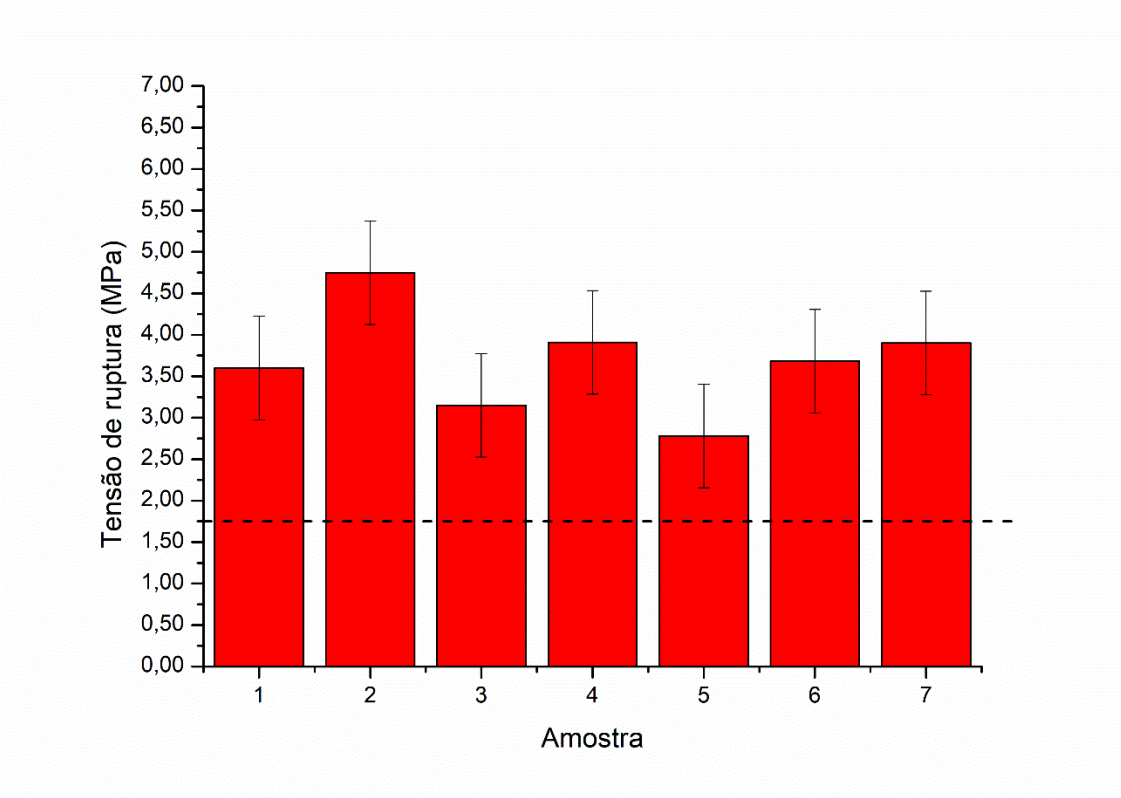
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Ensaio de resistência à compressão simples para MM.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (MPa)
1	56560	15702,18	3,60
2	74560	15693,83	4,75
3	49360	15691,74	3,15
4	61300	15681,29	3,91
5	43580	15656,25	2,78
6	57700	15677,13	3,68
7	61240	15702,17	3,90
	Média total		3,68
	Desvio padrão		0,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

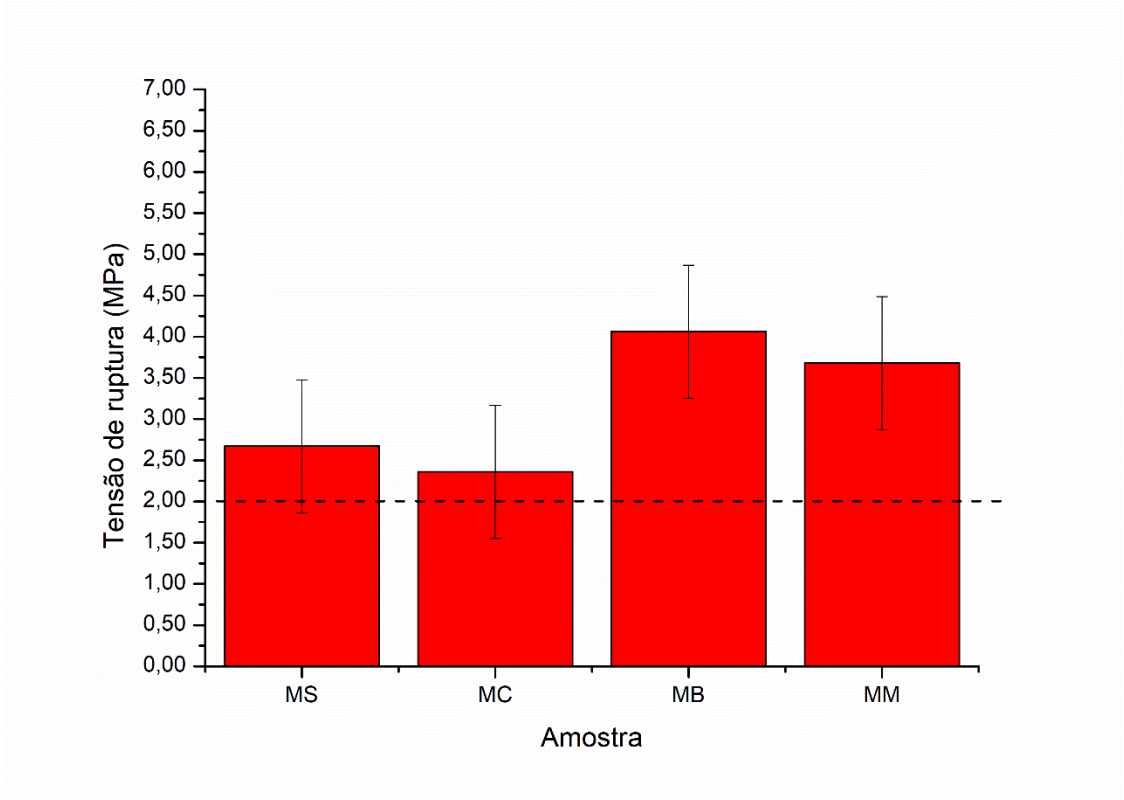
Figura 49 – Valores individuais para ensaio de resistência à compressão simples para MM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores obtidos, foi elaborada a Figura 50 comparando os valores médios de resistência à compressão, considerando uma linha tracejada referente ao valor mínimo requerido pela norma.

Figura 50 – Valores médios para resistência à compressão simples para amostras MS, MC, MB e MM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 50, o experimento de MB apresentou o maior valor médio para resistência à compressão, seguido da amostra de MM. Por outro lado, o experimento de MC obteve o menor resultado médio, seguido do experimento MS. Todos os experimentos apresentaram resultados satisfatórios para todas as amostras ensaiadas, conforme Figura 50.

Para Salomão, Silva e Barbosa (2019), a adição de cal na mistura do solo obteve uma tensão de ruptura de 3,37 MPa. Já Castro *et al.* (2016), ao agregar coproduto siderúrgicos no solo, formados por pó de despoeiramento (PD), e blocos de solo-cimento defeituosos finamente granulados (RB), o experimento atingiu à tensão de compressão de 2,3 MPa. Por fim, Mendes, Zanotti e Menezes (2014) também trazem resultados satisfatórios ao adicionar resíduo do polimento de grés de porcelanato aos tijolos, atingindo um valor mínimo de 6,33 MPa para o ensaio de resistência à compressão simples.

4.1.5 Absorção de água

Segundo a ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013), os corpos de prova não devem apresentar valor médio para absorção de água superior à 20% e valores individuais maiores que 22%. As Tabelas 34, 35, 36 e 37 apresentam os resultados do ensaio aplicado para os experimentos. Em adição, a Figura 51 ilustra os resultados obtidos para cada amostra, considerando uma linha tracejada referente ao valor mínimo individual definido pela norma.

Tabela 34 – Ensaio de absorção de água para MS.

Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de água (%)
8	2657,6	3158,2	18,8
9	2752,0	3235,5	17,6
10	2695,7	3186,2	18,2
	Valor médio		18,2
	Desvio padrão		0,63

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 – Ensaio de absorção de água para MC.

Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de água (%)
8	2994,4	2440,2	22,7
9	3022,6	2468,9	22,4
10	3017,2	2458,1	22,7
	Valor médio		22,6
	Desvio padrão		0,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Ensaio de absorção de água para MB.

Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de água (%)
8	2787,0	3253,5	16,7
9	2829,3	3340,1	18,1
10	2725,0	3192,5	17,2
	Valor médio		17,3
	Desvio padrão		0,67

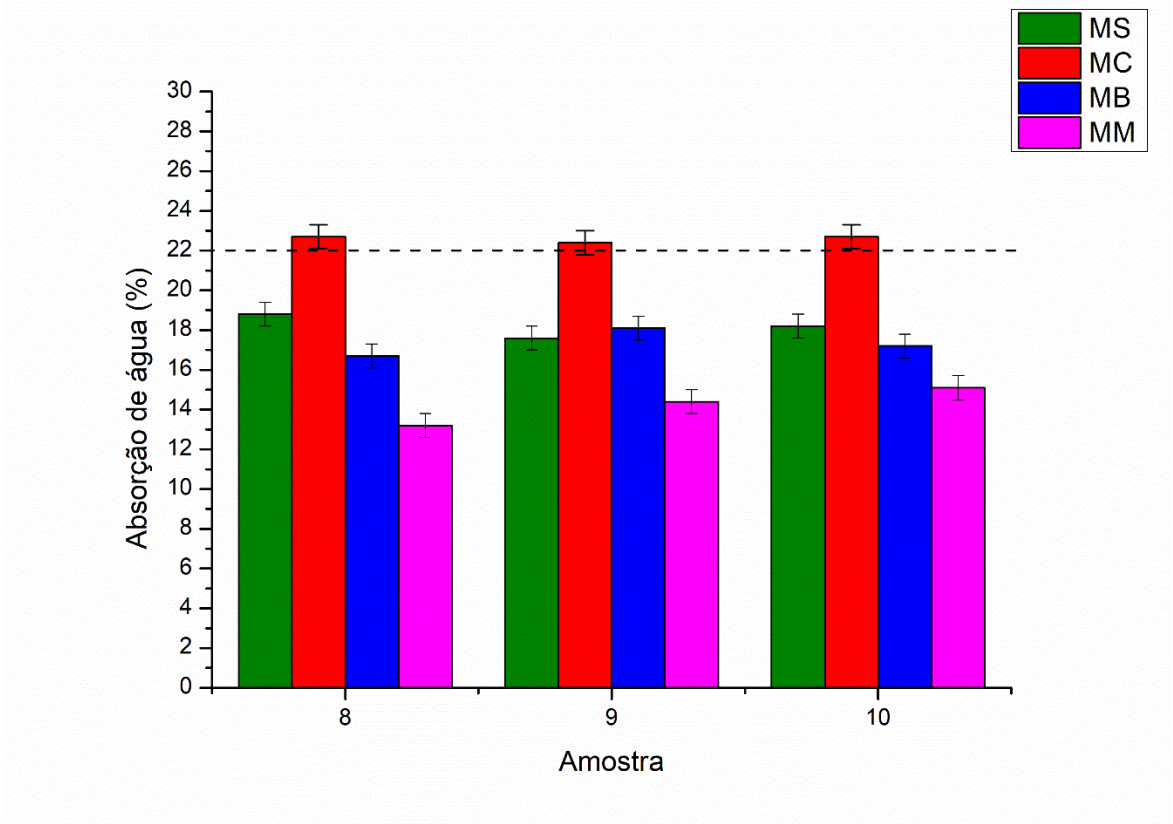
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 37 – Ensaio de absorção de água para MM.

Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de água (%)
8	2905,4	3289,7	13,2
9	2982,9	3411,1	14,4
10	2947,8	3393,8	15,1
	Valor médio		14,2
	Desvio padrão		0,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

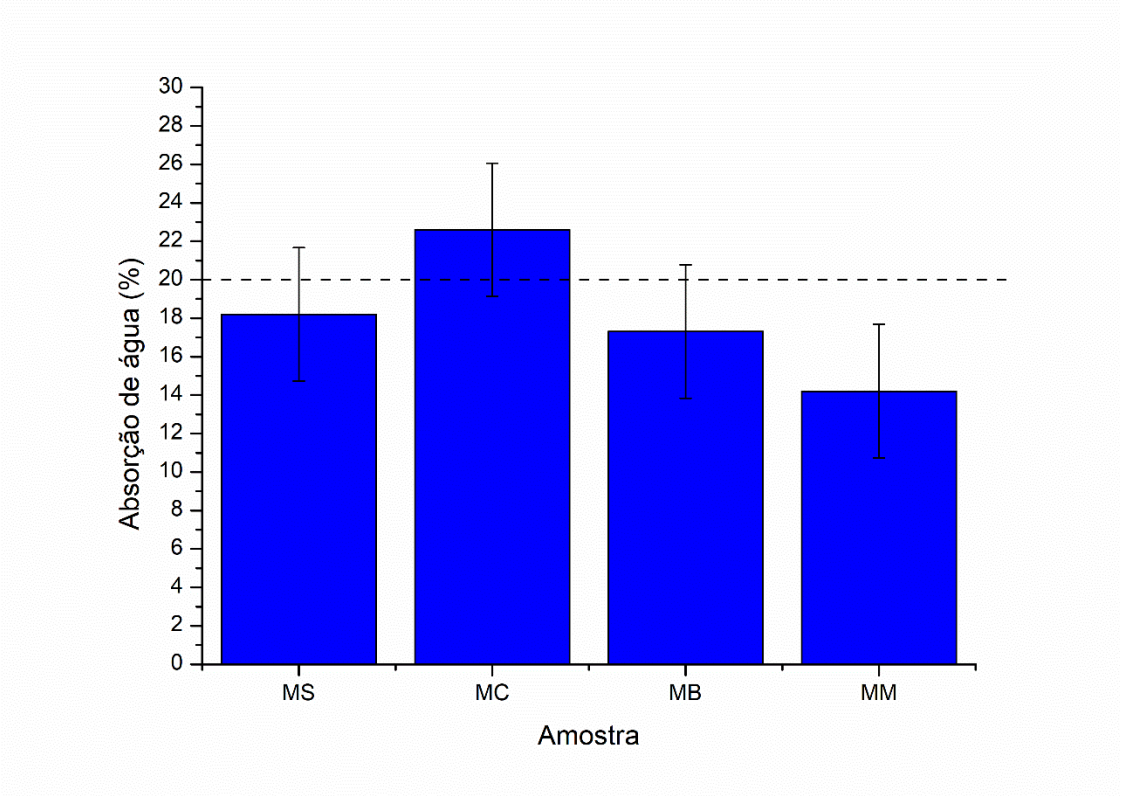
Figura 51 – Valores individuais para ensaio de absorção de água para amostras MS, MC, MB e MM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores obtidos, foi elaborada a Figura 52 comparando os valores médios de absorção de água, considerando uma linha tracejada referente ao valor médio requerido pela norma.

Figura 52 – Valores médios para ensaio de absorção de água para amostras MS, MC, MB e MM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 52, o menor índice para absorção de água foi alcançado pela amostra de MM, apresentando um valor igual a 14,2%, seguido pelo experimento MB, com 17,3%, depois a amostra de MS com o índice de 18,2% e por fim, a mistura MC com valor de absorção de água de 22,6%.

De acordo com os valores obtidos no ensaio de absorção de água, as amostras de MS, MB e MM apresentaram valores satisfatórios, conforme resultados obtidos por Pinheiros *et al.* (2013), atingindo 14% de absorção de água de tijolos com adição de *grits.* Albuquerque *et al.* (2008) também obtiveram valores interessantes com adição de montículo do cupim no tijolo solo-cimento. Os autores atingiram um índice de absorção de 12,32%.

Por outro lado, o experimento contendo cal obteve valores individuais e a média superior ao estabelecido pela ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013). No entanto, este resultado vai de encontro com estudo realizado por Guettala *et*

al. (2002). Os autores atingiram o valor mínimo de 16% ao adicionarem cal para estabilização de blocos de terra. A partir dessa informação, é possível afirmar que para as características químicas e físicas do solo usado no experimento, a adição de cal pode ter ocasionado um aumento da porosidade do corpo de prova.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou importantes influências nas características físico-químicas dos materiais adicionado ao solo como mostrados no capítulo 4 Resultados e Discussões. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

As adições de resíduo de mármore e pó de rocha são uma boa opção para corrigir e promover melhorias nas propriedades mecânicas do solo. O solo usado no experimento apresentou um percentual de material passante igual a 46,34% na peneira 0,075 mm, formado por silte e argila. Com isso, o material coletado pode ser classificado como aspecto arenoso. Ao realizar os ensaios de caracterização, o solo atingiu resultados necessários para análise granulométrica, classificado como solo arenoso, mas obteve percentuais superiores ao permitido pela norma para limite de liquidez e índice de plasticidade, apresentando percentuais iguais a 50,69% e 19,44% respectivamente, segundo a ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013).

Níveis superiores ao permitido pela norma para os limites de consistência descrevem uma tendência de surgimento de trincas durante a secagem, sendo diretamente afetado pela presença de argila na composição. Por outro lado, esse experimento apresentou valores ótimos para resistência à compressão simples e absorção de água, obtendo, nesta ordem, 2,67 MPa e 18,2%, de acordo com ABNT NBR 8491:2012 (versão corrigida: 2013).

Para isso, deve-se aplicar uma correção ao solo para atender as exigências apresentadas nas normas anteriormente informadas, principalmente para controle de contração durante a secagem. As amostras contendo pó de rocha e resíduo de mármore se mostram como potenciais materiais para corrigir as propriedades físicas e mecânicas do solo. Para essas misturas, o ensaio granulométrico obteve percentuais iguais a 42,99% e 48,88% de material passante na peneira 0,075 mm para as amostras contendo pó de rocha e resíduo de mármore, respectivamente.

Apesar da mistura com pó de rocha possuir menor número de material passante na peneira citada se comparado a mistura MS, houve um aumento no índice de partículas retidas entre os diâmetros 0,595 mm à 0,149 mm, principalmente entre o intervalo 0,250 mm e 0,149 mm. Por outro lado, o experimento contendo resíduo de mármore adquiriu maior percentual de partículas passantes na peneira 0,075 mm comparado também ao solo. Ambas amostras conseguiram aumentar um índice de partículas com diâmetros inferiores, sendo necessárias para o preenchimento da composição, provocando menor presença de vazios.

Em adição, os materiais foram satisfatórios para os limites de consistência, adquirindo valores de 41,80% e 37,06% para limite de liquidez e 16,75% e 16,06% para índice de plasticidade para os experimentos MB e MM, nesta ordem. Por fim, foi obtido um percentual de absorção de água igual a 17,3% e 14,2% e valor de resistência à compressão de 4,06 MPa e 3,68 MPa para a mistura com rocha e resíduo de mármore, na devida ordem. Logo, ambas amostras podem ter influenciado em um aumento na porosidade dos tijolos e aumentaram a resistência mecânica por meio de uma possível redução de vazios na composição.

Devido ao amplo uso de pó de rocha na construção civil, este material apresenta maior disponibilidade no mercado local e não necessita de ensaios laboratoriais para viabilizar o seu uso. Além disso, o ensaio granulométrico apresentou partículas com diâmetros característicos para auxiliar no preenchimento de vazios presentes no solo. Com isso, o componente poderia promover uma redução no percentual de cimento usado, necessitando de novos estudos na relação entre o teor de cimento e o aumento no percentual de pó de rocha adicionado.

Por outro lado, o uso de resíduo de mármore apresenta benefícios sustentáveis, uma vez que este material tem um impacto ambiental significativo no descarte irregular, além de exigir coleta especializada. No entanto, devido a uma variabilidade na composição das rochas, seria necessário aplicar análises químicas e físicas para cada amostra utilizada à fim de garantir propriedades mecânicas suficientes para os tijolos.

A adição de cal como material alternativo não foi recomendada, uma vez que os corpos de prova tiveram redução de desempenho nos ensaios aplicados. Apesar de interessante o resultado de resistência à compressão, obtendo 2,36 MPa, o índice de absorção de água se mostrou acima do estabelecido em norma, em torno de 22,6%. Além disso, a mistura não apresentou estado plástico e líquido nos ensaios de limites de consistência, não respeitando as diretrizes estabelecidas na ABNT NBR 10833:2012 (versão corrigida: 2013).

Isso é justificado pela cal hidratada ser classificada como aglomerante, endurecendo o experimento rapidamente. Por exercer a mesma função do cimento na mistura, este material poderia ser usado para diminuir o teor de cimento aplicado. Para isso, serão necessários novos estudos na relação entre os teores de cimento e cal adicionados.

As amostras MB e MM apresentam propriedades mecânicas suficientes para garantir segurança em sua aplicação na construção civil. Para certificar potenciais econômicos e comerciais para esses produtos, será necessário realizar ensaios térmicos e acústico objetivando garantir uma total aplicabilidade em obras residenciais. Além disso, trabalhos futuros serão necessários para avaliar uma diminuição do teor de cimento usado, aumentando o percentual de material incorporado. Esses estudos seriam importantes como medida para diminuir o custo de fabricação dos tijolos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Felipe Nylo. **Utilização de resíduo de mármore como dessulfurante de ferro-gusa**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória.

ALBUQUERQUE, Leandro Queiroz Corrêa de. Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (Kollar, 1832). **Revista Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 553-560, abr. 2008.

ALMEIDA, Bivaldo Gomes de *et al*. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. 2012. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/950832/1/ComTec66AnaliseGranulometrica.pdf. Acesso em: 28 abr. 2020.

ALVES, Joner Oliveira *et al*. Resíduo do corte de granito: inovação tecnológica para a destinação final. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 123-128, jun. 2015.

ARTETIS. **Massa específica e absorção de agregados graúdos**. 2014. Disponível em: https://www.arteris.com.br/wp-content/uploads/2018/07/ME-Massa-espec%C3%ADfica-e-absor%C3%A7%C3%A3o-de-agregados-gra%C3%BAdos.pdf. Acesso em: 20 maio 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento: diferentes tipos e aplicações**. 2018. Disponível em: https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/?politica=sim. Acesso em: 20 abr. 2020.

_____. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. Boletim Técnico 111 São Paulo, 2000. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/BT-111.pdf. Acesso em: 01 mai. 2020.

_____. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. Boletim Técnico 106 São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2011/02/BT106_guia_basico_de_utilizacao_do_cimento_portland.pdf. Acesso em: 25 jan. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. 2018. Disponível em: https://abirochas.com.br//wp-content/uploads/2018/06/abinoticias/Setor_de_Rochas_Ornamentais.pdf. Acesso em: 28 maio 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453:** Cal virgem para construção civil – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
_____. **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
_____. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
_____. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
_____. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE TIJOLO ECOLÓGICO. **O tijolo ecológico**. 2018. Disponível em: https://www.aniteco.org.br/o-tijolo-ecologico. Acesso em: 24 abr. 2020.

AVELLAR JUNIOR, Luiz Antonio Avellar Mendes de *et al*. Alvenaria estrutural na construção civil. **Revista Eletrônica Teccen**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 16-22, dez. 2018.

BAPTISTA JUNIOR, Joel Vieira; ROMANEL, Celso. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. **Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 5, n. 480, p. 27-37, dez. 2013.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 356, p. 501-508, dez. 2014.

BATIC, O.r. *et al*. Rebar corrosion in mortars with high limestone filler content. **Anti-corrosion Methods And Materials**, [s.l.], v. 60, n. 1, p. 3-13, 4 jan. 2013.

BEDIAKO, Mark; AMANKWAH, Eric Opoku. Analysis of chemical composition of Portland cement in Ghana: A key to understand the behavior of cement. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 2015, p. 1-5, nov. 2015.

BETSUYAKU, Renato Yochio. **Construção de eco tijolos com adição de areia diatomácea**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

CAFETORAH. **Jericó, a cidade mais antiga do Mundo e a conquista da Terra Prometida**. 2016. Disponível em: https://cafetorah.com/jerico-cidade-mais-antiga-mundo/. Acesso em: 02 abr. 2020.

CAILLAHUA, Mariella Cortez; MOURA, Francisco José. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement. **Journal Of Materials Research And Technology**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 190-197, abr. 2018.

CAMACHO, J. S. *et al*. Influência do graute e da taxa de armadura no comportamento à compressão da alvenaria de blocos de concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 341-364, jun. 2015.

CAMPOS, Alessandro; NASCIMENTO JUNIOR, João Batista do; BRITO, Larissa Tessari. Comportamento estrutural de tijolos de solo-cimento utilizando diferentes fontes de água e métodos de cura. **Interações (campo Grande)**, Campo Grande, v. 20, n. 1, p. 283-296, 21 mar. 2019.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações:** fundamentos. 6 ed.Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234 p.

CASTRO, Mário Andrean Macedo *et al*. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 666-676, set. 2016.

CHANDARA, Chea *et al*. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. **Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 5, p. 1675-1679, maio 2009.

CHAVHAN, Pooja; BHOLE, S. D. To Study the Behaviour of Marble Powder as Supplementry Cementitious Material in Concrete. **International Journal Of Engineering Research And Applications,** v. 4, n. 4, p.377-381, abr. 2014.

COLETI, Jorge Luís *et al*. Uso do resíduo de mármore e aluminato de cálcio em escórias sintéticas dessulfurantes de aço. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 188-194, set. 2015.

CONEXÃO MINERAL. **Pó de brita com taxação diferente da brita tem gerado preocupação no RS**. 2018. Disponível em: http://www.conexaomineral.com.br/noticia/1000/po-de-brita-com-taxacao-diferente-da-brita-tem-gerado-preocupacao-no-rs.html#foto/. Acesso em: 30 maio 2020.

CONSOLOTEC. **Limite de Liquidez**. 2018. Disponível em: https://consolotec.com.br/site/servicos_detalhes.html?projectId=16. Acesso em: 20 maio 2020.

CORDEIRO, Martha Eleonora Venâncio Mignot; CONCEIÇÃO, Patrícia Marluci da; LIMA, Thiago Vicente. Environmental education and the use of soil cement. **Revista Vértices**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 35-54, dez. 2006.

CORRÊA, Andréa Aparecida Ribeiro *et al*. Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva” in adobes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 98, p. 250-256, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Características de corretivos agrícolas**. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61985/1/Doc37ACP2004.pdf. Acesso em: 13 abr. 2020.

ESPUELAS, S. *et al*. Technical and environmental characterization of hydraulic and alkaline binders. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 196, p. 1306-1313, set. 2018.

FRAGA, Yuri Sotero Bomfim *et al*. Tecnologia dos materiais: utilização do tijolo de solo-cimento na construção civil. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 3, n. 3, p. 11-24, out. 2016.

FERNANDES, Antônio Vitor Barbosa; ALMEIDA, Edicarlos Soares Fernandes; ANDRADE FILHO, Gilson Santos. Alvenaria de bloco cerâmico x bloco de concreto. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 3, p. 37-66, mar. 2016.

FIGUEIREDO, Suélen Silva; SILVA, Cibelle Guimarães; NEVES, Gelmires A. Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 3, p. 273-279, set. 2011.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e Rochas**: aplicações na estabilidade de taludes. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 576 p.

FONSÊCA, Nayara Jhéssica Marques da. **Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico**. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GALO, David de Barros. **Cal**. 2014. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/cal-sumario-mineral-2014. Acesso em: 27 maio 2020.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

GARCIA, E. *et al*. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 251-258, jun. 2015.

GUETTALA, A. *et al*. Durability of lime stabilized Earth blocks. **Courrier Du Savoir**, Biskra, n. 2, p. 61-66, jun. 2002.

HAGEMANN, Sabrina Elicker. **Materiais de construção básicos.** Porto Alegre: Instituto Federal Sul-rio-grandense, 2011. 145 p.

HOLANDA, J.N.F; SIQUEIRA, F.B. Reuse of grits waste for the production of soil – cement bricks. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 131, p. 1-6, 2013.

HOFFMANN, Luana Gabriela et al. **ALVENARIA ESTRUTURAL: um levantamento das vantagens, desvantagens e técnicas utilizadas, com base em uma pesquisa bibliográfica nacional**. 2012. Disponível em: eventos.uem.br/index.php/simpgeu/simpgeu/paper/viewFile/944/747. Acesso em: 07 abr. 2020.

HOUSE, Master. **Alvenaria**: história, conceito e aplicações. história, conceito e aplicações. 2020. Disponível em: https://www.masterhousesolucoes.com.br/alvenaria-historia-conceito-e-aplicacoes/. Acesso em: 02 mar. 2020.

INTERNATIONAL LIME ASSOCIATION. **World lime production**. 2020. Disponível em: https://www.internationallime.org/world-lime-production. Acesso em: 27 maio 2020.

KHALIQ, Shams Ul *et al*. Marble Powder's Effect on Permeability and Mechanical Properties of Concrete. **International Journal Of Civil, Environmental, Structural, Construction And Architectural Engineering,** [s.l], v. 10, n. 4, p.522-527, 2016.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 3, n. 7, p. 185-191, 2012.

LA SERNA, Humberto Almeida de; REZENDE, Márcio Marques. **Agregados para a construção civil**. 2013. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais. Acesso em: 20 maio 2020.

LEANDRO, Adriano Peixoto *et al*. Estudo do resíduo de caulim pegmatítico usado como ingrediente na formulação de cimento Portland. **Holos**, Natal, v. 6, p. 224, 5 dez. 2017.

LEÓN, María Patricia; RAMÍREZ, Fernando. Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. **Revista Ingeniería de Construcción**, Santiago, v. 25, n. 2, p. 215-240, ago. 2010.

LIMA, Valmique Costa; LIMA, Marcelo Ricardo de; MELO, Vander de Freitas. **O solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio**. 2007. Disponível em:

http://www.gestaoescolar.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/solo_escola/solo_meio_ambiente.pdf. Acesso em: 25 abr. 2020.

LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2012. 984 p.

MARINHO, Ana Luiza Borges. **Aglomerante ecológico para argamassa - reciclagem da escória de forno panela**. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

MARINHO, Filipe. **Análise granulométrica do solo**. 2020. Disponível em: https://www.guiadaengenharia.com/analise-granulometrica-solo/. Acesso em: 17 maio 2020.

MASSON, Alana Carolina *et al*. Absorção de água em tijolos. **Revista Maiêutica**, Indaial, v. 2, n. 1, p. 7-24, 2016.

MENDES, Rodrigo; ZANOTTI, Robin Alex Reyes; MENEZES, Jean Carlo Salomé dos Santos. Produção de solo-cimento (tijolo ecológico) utilizando resíduo do polimento de grés de porcelanato como fonte de sílica. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 1, n. 1, p. 50-55, 2014.

MENOSSI, Rômulo Tadeu *et al*. Pó de pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto?. **Revista Holos Environment**, Rio Claro, v. 10, n. 2, p. 209-221, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório técnico 30: perfil de brita para construção civil**. 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construxo_civil.pdf. Acesso em: 27 maio 2020.

NENO, Catarina; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production. **Materials Research**, São Carlos, v. 1, n. 17, p. 168-177, 2014.

NEVES, Célia M. Martins *et al*. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – prática de campo**. 2010. Disponível em: https://www.promemoria.indaiatuba.sp.gov.br/arquivos/proterra-selecao_de_solos_2010.pdf. Acesso em: 18 maio 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Emissões de gás carbônico do setor de construção chegaram a 76 gigatoneladas em 2010-2016**. Disponível em: https://nacoesunidas.org/emissoes-de-gas-carbonico-do-setor-de-construcao-chegaram-a-76-gigatoneladas-em-2010-2016/. Acesso em: 02 jun. 2020.

PAIVA, Sérgio Carvalho; GOMES, Eduardo Alves de Oliveira; OLIVEIRA, Romilde Almeida de. Controle de qualidade da cal para argamassa –

metodologias alternativas. **Revista Ciências & Tecnologia**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 1-11, dez. 2007.

PELLETIER-CHAIGNAT, Laure *et al*. Beneficial use of limestone filler with calcium sulphoaluminate cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 619-627, jan. 2012.

PEREIRA, Adriana Maria; FAZZAN, João Victor; FREITAS, Verônica de. Análise da viabilidade do uso de fibra de borracha de pneu como reforço em tijolo de solo cimento. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [s.l.], v. 3, n. 20, p. 53-65, 2015.

PEREIRA, Caio. **O que é Alvenaria?**. 2019. Disponível em: https://www.escolaengenharia.com.br/alvenaria/. Acesso em: 02 abr. 2020.

PICANÇO, M. S.; ANGÉLICA, R. S.; BARATA, M. S. Avaliação preliminar do emprego de arenito zeolítico da região nordeste do Brasil como material pozolânico para cimento Portland. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 344, p. 467-473, dez. 2011.

PINHEIRO, Márcia Lana *et al*. Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de *grits*. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 29-46, 2013.

PISANI, Maria Augusta Justi. **Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo cimento**. **Sinergia**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 53-59, jul. 2005.

PORRAS, Álvaro Chávez; ISAAC, Ricardo de Lima; MORITA, Dione. Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria - tijolos estabilizados com cimento. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, Bogotá, v. 18, n. 2, p. 5-28, 1 dez. 2008.

PORTAL DO CONCRETO. **Resistência característica do concreto à compressão**. 2018. Disponível em: https://www.portaldoconcreto.com.br/controle-tecnologico. Acesso em: 26 maio 2020.

PUGLIESI, Nataly. Cimento: diferentes tipos e aplicações. 2020. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/revista/materias/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/11959. Acesso em: 23 abr. 2020.

RAYMUNDO, Valério *et al*. Resíduos de serragem de mármores como corretivo da acidez de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 1, n. 17, p.47-53, out. 2012.

ROCHA, Cyntia de Oliveira *et al*. Caracterização de blocos em concreto para alvenaria estrutural do município de Muriaé-MG. **Revista Interdisciplinar de Pensamento Científico**, Itaperuna, v. 3, n. 2, p. 98-111, jul. 2017.

RODRIGUES, D.C.Q *et al.* Modelagem matemática de um forno rotativo empregado na produção de clínquer. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 350, p. 302-309, jun. 2013.

ROSSA JUNIOR, J.; PORTELLA, K. F. Adição de escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I. **Cerâmica**, São Paulo, v. 58, n. 348, p. 542-548, dez. 2012.

RUIZ, Hugo Alberto. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 297-300, abr. 2005.

SABBATINI, Fernando Henrique. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural silico-calcária**. 1984. 298 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador; SILVA, Breno Alcântara; BARBOSA, Flávio Alchaar. Estabilização química de solo de textura franco: adição de cal e cimento. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 8, n. 5, p. 1-15, 2019.

SEGANTINI, Antonio Anderson da Silva; WADA, Patrycia Hanna. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 179-183, abr. 2011.

SEGANTINI, Antonio Anderson da Silva. **UTILIZAÇÃO DE SOLO-CIMENTO PLÁSTICO EM ESTACAS ESCAVADAS COM TRADO MECÂNICO EM ILHA SOLTEIRA-SP**. 2000. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/257598/1/Segantini_AntonioAndersondaSilva_D.pdf. Acesso em: 01 maio 2020.

SILVA, Sandra Regina da. **Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira**. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8C5PAL/1/tijolos_de_solo_cimento_refor_ado..._sandra_regina_da_silva.pdf. Acesso em: 17 maio 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Dados do setor**. 2016. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-do-setor.php. Acesso em: 23 abr. 2020.

_____. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. 2019. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acesso em: 23 abr. 2020.

SIQUEIRA, F.B *et al*. Influence of industrial solid waste addition on properties pf soil-cement bricks. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 62, p. 237-241, 2016.

SOUSA, Fernanda Oliveira de. **Análise de viabilidade técnica do uso de solo-cimento reforçado com fibras de coco para pavimentação**. 2019. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SOUZA, Márcia I. B.; SEGANTINI, Antonio A. S.; PEREIRA, Joelma A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduo de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 205-212, 2008.

SPLABOR. **Agitador de peneiras granulométricas – instruções gerais de uso**. 2018. Disponível em: https://www.splabor.com.br/blog/peneiras/agitador-de-peneiras-granulometricas-instrucoes-gerais-de-uso. Acesso em: 18 maio 2020.

TEIXEIRA, Paulo César *et al* (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017. 116 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172279/1/Pt-1-Cap-10-Analise-granulometrica.pdf. Acesso em: 17 maio 2020.

TENÓRIO, Jorge Alberto Soares *et al*. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte I: alita pura. **Rem**: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p. 87-90, jun. 2003.

THOMAZ, Ercio *et al.* **Código de práticas nº 01: alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. 2009. Disponível em: https://www.ipt.br/download.php?filename=113-Codigo_de_Praticas_n_01.pdf. Acesso em: 07 abr. 2020.

TRINDADE, Tiago Pinto da *et al*. **Compactação dos solos:** fundamentos teóricos e práticos. Viçosa: UFV, 2008. 95 p.

UETA, Fabio Rafael Mota. **Fissuras em alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 60 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construções Civis, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2013.

VERDE EQUIPAMENTOS. **Máquina de tijolo ecológico manual 12,5 x 25**. 2019. Disponível em: https://verdeequipamentos.com.br/produtos/maquina-de-tijolo-ecologico-manual-125x25. Acesso em: 22 maio 2020.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Obras especiais**. 2020. Disponível em: https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-votoran/obras-especiais-industrial-meios-agressivos/. Acesso em: 30 maio 2020.

_____. **Tipos de brita: conheça as diferenças**. 2016. Disponível em: https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/conheca-os-tipos-de-brita/. Acesso em: 28 maio 2020.

_____. **Tipos e usos da cal: conheça diferenças e aplicações**. 2016. Disponível em: https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/tipos-e-usos-da-cal-conheca-diferencas-e-aplicacoes. Acesso em: 26 maio 2020.