



**ELIZIANE DENIZE DE CASTRO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CASCA DE  
CAFÉ NAS PROPRIEDADES DE TIJOLOS DE  
SOLO-CIMENTO**

**LAVRAS - MG**

**2017**

**ELIZIANE DENIZE DE CASTRO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CASCA DE CAFÉ NAS  
PROPRIEDADES DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes

Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes

Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Castro, Eliziane Denize de.

Análise da aplicação de casca de café nas propriedades de tijolos  
de solo-cimento/ Eliziane Denize de Castro. - 2017.

113 p.

Orientador: Lourival Marin Mendes.

Coorientador: Rafael Farinassi Mendes

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Solo-cimento. 2. Resíduo vegetal. 3. Isolamento térmico. I.  
Mendes, Lourival Marin. II. Mendes, Rafael Farinassi. III. Título.

**ELIZIANE DENIZE DE CASTRO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CASCA DE CAFÉ NAS  
PROPRIEDADES DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

**ANALYSIS OF THE APPLICATION OF COFFEE PEEL OVER THE  
PROPERTIES OF SOIL-CEMENT BRICKS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de março de 2017.

Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato      EPAMIG

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro      UFLA

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ser minha fonte de inspiração, força e coragem.

Aos meus pais, João e Maria Helena e a minhas irmãs, Eliane e Elisângela, por todo amor, compreensão e incentivo e por serem meus maiores exemplos de vida.

Ao meu noivo, Cláudio, por ter demonstrado o verdadeiro significado da palavra companheirismo, sempre oferecendo sua ajuda, apoio e carinho.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação, em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade concedida de cursar o mestrado.

Aos professores, Dr Lourival Marin Mendes e Dr Rafael Farinassi Mendes, pela orientação e incentivo dados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários, técnicos e alunos do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia da UFLA, principalmente, ao professor Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro, por toda a ajuda oferecida no decorrer deste trabalho.

Aos amigos e funcionários da UEPAM, pela partilha de conhecimentos e amizade.

Aos amigos da PREFEITURA UNIVERSITÁRIA, pela amizade, compreensão e apoio.

Enfim, a todos que contribuíram e torceram para a conclusão deste trabalho, o meu muito obrigada!

## RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade é uma vertente que, atualmente, atinge todos os setores de produção, inclusive, a construção civil, que faz crescer a busca por materiais que provoquem menos impactos ambientais em sua fabricação. Nesse contexto, o tijolo de solo-cimento feito, a partir de uma mistura homogeneizada de solo, cimento e água, apresenta-se como uma alternativa, uma vez que não exige queima em forno à lenha, evitando desmatamentos e a poluição do ar. Existe, ainda, a possibilidade de aproveitamento de resíduos agrícolas em sua fabricação, contribuindo, assim, para diminuir o descarte inadequado desses materiais na natureza. O presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da incorporação de partículas de casca de café (*Coffea arabica* L.), em substituição parcial ao cimento, sobre as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de tijolos de solo-cimento, em diferentes idades. Na produção dos tijolos, foi utilizado solo, que, por suas características iniciais, necessitou de correção granulométrica com areia, cimento Portland do tipo CP II F-32 e partículas de casca de café. Definido o percentual inicial de cimento na mistura em 10%, foram inseridos percentuais de casca de café, em relação ao cimento, iguais a 5%, 10%, 15% e 20%. Os tijolos foram submetidos aos ensaios de absorção, compressão simples, nas idades de 14, 28 e 56 dias, isolamento térmico, aos 28 dias e durabilidade aos 56 dias. Os resultados encontrados demonstraram que a substituição parcial do cimento por casca de café teve efeito significativo nas propriedades, conforme o aumento no teor de casca, maiores foram os valores obtidos, para absorção de água, variação de volume e perda de massa no ensaio de durabilidade, ao passo que menores foram os resultados da resistência à compressão e massa específica aparente seca. A interação entre o teor de casca e a idade dos corpos de prova foi significativa apenas para a variável resistência à compressão. A condutividade térmica não foi influenciada pelo acréscimo de resíduo vegetal, porém o valor encontrado foi inferior ao determinado pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), o que evidencia o potencial isolante do tijolo desenvolvido. Apenas o tratamento com 0% de casca de café, aos 56 dias de idade, conseguiu atingir a resistência mínima de 2MPa, assim como absorção de água abaixo de 20%, requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2012a). De um modo geral, pode-se concluir que a substituição de cimento por casca de café, da maneira como foi concebida neste trabalho, não apresentou resultados satisfatórios perante os requisitos normativos, entretanto não se pode descartar a possibilidade de emprego desse resíduo, em misturas de solo-cimento, uma vez que outras variáveis interferiram na qualidade do material. Aconselha-se que novos estudos sejam desenvolvidos buscando otimizar o processo de produção bem como melhorar a compatibilidade entre a matéria vegetal e o cimento.

**Palavras-chave:** Resistência à compressão. Durabilidade. Isolamento térmico. Partículas vegetais.

## ABSTRACT

The concern with sustainability is an aspect that currently reaches all production sectors, including that of civil construction, which demands materials that cause less environmental impacts in its fabrication. In this context, the soil-cement brick, made from a homogeneous mixture of soil, cement and water, is an alternative given that it does not demand burning in firewood oven, avoiding deforestation and air pollution. There is also the possibility of using agricultural waste in its fabrication, thus contributing to decrease the inadequate disposal of these materials. This work aimed at studying the effects of incorporating particles of coffee peel (*Coffea arabica* L.), in different ages, in partial substitution of cement over the physical, mechanical and thermal properties of the soil-cement. For the production of the bricks, we used type CP II F-32 Portland cement, particles of coffee peel and soil, which, due to its initial characteristics, demanded particle correction with sand. With the definition of initial percentage of cement in the mixture at 10%, the percentages of coffee peel in relation to cement were of 5%, 10%, 15% and 20%. The bricks submitted to absorption, simple compression (at ages of 4, 28 and 56 days), thermal isolation (at 28 days) and durability (at 56 days) trials. The results showed that the partial substitution of cement for coffee peel presented significant effect over the properties, which, with the increase in coffee peel content, the values obtained for water absorption, variation of volume and loss of mass in the durability trial increased, while resistance to compression and apparent specific dry mass decreased. The interaction between the content of peel and the age of the samples was significant only for the variable resistance to compression. The thermal conductivity was not influenced by the increase in plant residue. However, the value found was inferior to that determined by the NBR 15220-2 (ABNT, 2005), which demonstrates the isolating potential of the brick. Only the treatment with 0% of coffee peel at 56 days of age reached the minimum resistance of 2MPa, as occurred with water absorption at 20%, requisites of NBR 8491 (ABNT, 2012). In general, we conclude that the substitution of cement for coffee peel, in the manner done in this work, presented no significant results regarding the normative requisites. However, the possibility of employing this waste in soil-cement mixtures cannot be disposed of, given that other variables interfered in the quality of the material. Further studies must be developed seeking to optimize the production process and to improve the compatibility between the plant material and the cement.

**Keywords:** Resistance to compression. Durability. Thermal isolation. Plant particles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil geotécnico do solo residual de gneiss do Rio de Janeiro.....	17
Figura 2 - Estrutura do solo .....	18
Figura 3 - Escalas granulométricas, em milímetros, adotadas pela A.S.T.M, A.A.S.H.T.O e ABNT.....	19
Figura 4 - Curva de compactação dos diversos solos brasileiros. ....	21
Figura 5 - Sistema convencional de produção de café.....	33
Figura 6 - Participação percentual na produção de café por UF. ....	34
Figura 7 - Exportação brasileira de café (em mil kg). ....	35
Figura 8 - Delineamento Experimental.....	49
Figura 9 - Esquema de produção dos tijolos. ....	52
Figura 10 - Prensagem dos tijolos. ....	53
Figura 11 - Processo de cura dos tijolos. ....	54
Figura 12 - Ensaio de absorção de água. ....	56
Figura 13 - Tijolos de solo-cimento no ensaio de compressão. ....	57
Figura 14 - Aparato experimental para análise do conforto térmico. ....	59
Figura 15 - Curva granulométrica do solo natural e corrigido. ....	62
Figura 16 - Curva de Compactação para todas as porcentagens de casca de café avaliadas.....	68
Figura 17 - Análise de regressão, valores médios e respectivos desvio padrão, para a massa específica aparente seca, nos diferentes níveis de substituição de cimento por casca de café.....	74
Figura 18 - Valores médios e desvio padrão da massa específica aparente seca, em função da idade de avaliação dos tijolos.....	75
Figura 19 - Relação entre a massa seca e volume real e a massa seca e volume calculados. ....	77

Figura 20 - Análise de regressão, valores médios e respectivos desvio padrão, para a absorção de água, nos diferentes níveis de substituição de cimento por casca de café. ....	79
Figura 21 - Valores médios e desvio padrão, para a absorção de água, em função da idade de avaliação dos tijolos.....	81
Figura 22 - Análise de regressão para a resistência à compressão, nos diferentes níveis de substituição de cimento por casca de café, aos 14, 28 e 56 dias de idade.....	83
Figura 23 - Isolamento térmico dos tijolos de acordo com adição de casca de café.....	88
Figura 24 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	91
Figura 25 - Variação volumétrica ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. ....	93
Figura 26 - Absorção de água ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. ...	93
Figura 27 - Perda de massa após ciclos de molhagem e secagem.....	94
Figura 28 - Aspecto dos tijolos após os seis ciclos de molhagem e secagem. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais compostos do cimento. ....	23
Tabela 2 -	Crêterios para escolha do solo, segundo a HRB (1961). ....	26
Tabela 3 -	Teor de cimento. ....	30
Tabela 4 -	Requisitos para escolha do solo. ....	31
Tabela 5 -	Características técnicas. ....	31
Tabela 6 -	Características dimensionais. ....	32
Tabela 7 -	Condutividade térmica de alguns materiais de constru�o. ....	38
Tabela 8 -	Ensaio de caracteriza�o do solo. ....	46
Tabela 9 -	Ensaio para composi�o química. ....	47
Tabela 10 -	Quantidade dos materiais utilizados para confec�o de um tijolo. ....	51
Tabela 11 -	Ensaio de caracteriza�o dos tijolos. ....	54
Tabela 12 -	Composi�o granulométrica do solo natural e corrigido. ....	63
Tabela 13 -	Massa específica dos grãos de solo natural e corrigido. ....	65
Tabela 14 -	Valores de massa específica dos grãos de alguns tipos de minerais. ....	65
Tabela 15 -	Limites de Atterberg. ....	66
Tabela 16 -	Valores utilizados para classifica�o do solo, segundo a H.R.B. ....	66
Tabela 17 -	Valores obtidos para a massa específica aparente seca máxima e umidade ótima para as composi�es adotadas. ....	67
Tabela 18 -	Resultado da análise química e densidade básica das partículas. ....	69
Tabela 19 -	Composi�o química da casca de café in natura, de acordo com outros autores. ....	70

Tabela 20 -	Dimensões médias e desvio padrão dos tijolos produzidos de acordo com o tratamento e idade avaliados. ....	72
Tabela 21 -	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos e idades de avaliação, na variável massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> ). ....	73
Tabela 22 -	Grau de compactação dos tijolos de solo-cimento. ....	76
Tabela 23 -	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos e idades de avaliação, na variável absorção de água (%). ....	78
Tabela 24 -	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos e idades de avaliação, na variável resistência à compressão (MPa). ....	82
Tabela 25 -	Valores médios com seus respectivos desvios padrão, para a resistência à compressão, em MPa. ....	83
Tabela 26 -	Resultados encontrados na literatura para a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento com substituição parcial do cimento por resíduo vegetal. ....	84
Tabela 27 -	Valores médios com seus respectivos desvios padrão e teste de média, para a resistência à compressão, em MPa. ....	86
Tabela 28 -	Gradientes de temperatura de cada tratamento. ....	89
Tabela 29 -	Principais propriedades termofísicas dos tijolos. ....	90

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Solo: Origem e Estrutura .....	16
2.1.1	Granulometria do solo .....	18
2.1.2	Compactação dos solos .....	20
2.1.3	Estabilização de solos.....	22
2.2	Cimento Portland .....	23
2.3	Solo-cimento.....	25
2.4	Tijolo solo-cimento.....	28
2.5	Café .....	32
2.6	Conforto Térmico e Propriedades Térmicas.....	35
2.7	Mistura de solo-cimento e partículas vegetais.....	42
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	45
3.1	Material.....	45
3.1.1	Casca de café.....	45
3.1.2	Solo .....	45
3.1.3	Cimento Portland .....	46
3.2	Caracterização do Solo .....	46
3.2.1	Análise química das partículas .....	47
3.2.2	Densidade das partículas .....	47
3.3	Delineamento experimental .....	48
3.4	Produção dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-partículas.....	49
3.4.1	Determinação do traço.....	50
3.4.2	Preparação, prensagem e cura e dos tijolos .....	50
3.5	Avaliação dos tijolos .....	54
3.5.1	Análise dimensional .....	55
3.5.2	Ensaio de absorção de água .....	55
3.5.3	Ensaio de compressão .....	56
3.5.4	Ensaio de durabilidade .....	58
3.5.5	Conforto térmico.....	58
3.6	Análise Estatística .....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
4.1	Análise Granulométrica.....	61
4.2	Massa específica dos grãos de solo .....	64
4.3	Limite de Atterberg .....	65
4.4	Dosagem de cimento .....	66
4.5	Ensaio de Compactação.....	67
4.6	Caracterização das partículas de casca de café.....	69
4.7	Análise Dimensional .....	71

<b>4.8</b>	<b>Massa específica aparente seca e Grau de Compactação .....</b>	<b>73</b>
<b>4.9</b>	<b>Absorção de água.....</b>	<b>77</b>
<b>4.10</b>	<b>Resistência à compressão.....</b>	<b>82</b>
<b>4.11</b>	<b>Conforto Térmico e Propriedades Térmicas.....</b>	<b>88</b>
<b>4.12</b>	<b>Ensaio de Durabilidade .....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>96</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO A - TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DO CIMENTO ..</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXO B - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO HRB,</b>	
	<b>NORMATIZADO PELA ASTM-D3282 (ASTM, 1993).....</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de construção, em terra crua, vem sendo utilizado pelo homem há muitos anos, com o intuito de resolver problemas de habitação da humanidade. No Brasil, o processo construtivo por meio do uso do solo, foi introduzido pelos portugueses e teve presença marcante, no período colonial, com destaque para construções feitas, a partir de tijolos de adobe, pau a pique e taipa de pilão.

Algumas construções históricas, que usaram essas técnicas, estão presentes em nosso meio até hoje, comprovando a durabilidade deste tipo de material, porém, com o passar dos anos, essas práticas foram deixadas de lado, em virtude do avanço dos meios de transporte, da crescente industrialização e desenvolvimento de tecnologias, com consequente aprimoramento dos materiais de construção.

Entretanto o desenvolvimento da indústria traz consigo algumas adversidades, que contribuem para a degradação do meio ambiente, culminando na busca cada vez maior por métodos construtivos mais sustentáveis. Dessa forma, as técnicas que utilizam terra crua vêm sendo revisitadas.

Nos últimos anos, muitas pesquisas foram desenvolvidas, em todo o mundo, com o intuito de resgatar tais técnicas. Algumas delas utilizam-se de pequenas parcelas de cimento na mistura, dando origem às misturas de solo-cimento (o cimento atua na aglomeração das partículas e tende a aumentar a resistência do material), sendo frequente, também, a incorporação de outros tipos de materiais, tais como resíduos de origem industrial e agrícola. Alguns pesquisadores como Chaib, Kriker e Mekehermeche (2015), Sutas, Mana e Pitak (2011), Turgut e Algin (2007) e Zak et al. (2016) obtiveram bons resultados, para tijolos de solo e solo-cimento, incorporados a diversos tipos de fibras e partículas vegetais.

Além do apelo ambiental, construir com terra crua pode ser uma solução, para reduzir o déficit habitacional brasileiro, tendo em vista o baixo custo dos equipamentos necessários para fabricação dos elementos construtivos, a simplicidade da técnica, que pode ser facilmente repassada por meio de treinamentos e a possibilidade de utilizar o solo existente, na própria localidade, para fabricação de blocos e tijolos. Essas vantagens representam soluções para a dificuldade encontrada pela população, em obter moradia própria, em condições adequadas de habitabilidade, em razão dos custos dos materiais de construção e da dificuldade de acesso a esses materiais em regiões mais afastadas.

O presente estudo visa a contribuir com a disseminação de ideais sustentáveis, no âmbito da construção civil, que atendam tanto aos critérios ambientais quanto aos sociais e econômicos. Para tanto, optou-se pela produção de tijolos de solo-cimento, para fins de alvenaria de vedação, a partir da mistura de solo, cimento e resíduo agrícola.

O resíduo agrícola escolhido foi a casca de café, haja vista a grande produção cafeeira existente, no estado de Minas Gerais, em particular, na região Sul mineira, que implica a geração exacerbada deste resíduo, que, na maioria das vezes, é descartado de maneira inadequada no meio ambiente.

Ainda, a utilização da casca de café pode influenciar, positivamente, as propriedades dos tijolos, principalmente, quanto à redução do peso e ao aumento do isolamento térmico, proporcionando, assim, maior conforto para os ocupantes da edificação, além de difundir e ampliar a comercialização dos resíduos agrícolas, gerando mais uma fonte de renda aos produtores rurais.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da substituição de cimento por casca de café nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de tijolos de solo-cimento em diferentes idades.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Solo: Origem e Estrutura**

Na visão da engenharia, o solo pode ser definido como o agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas) com líquido e gás preenchendo os espaços vazios existentes (BRAJA, 2007).

O solo tem sua origem, na desagregação das rochas que, por sua vez, são agregadas de minerais ligados por intensas forças coesivas e permanentes (AZAMBUJA, 1979; TERZAGHI; PECK, 1961). O processo de formação dos solos envolve vários fatores como agentes atmosféricos, água, variações de temperatura e decomposições químicas, que são responsáveis pela transformação da rocha em solo (CYTRYN, 1957).

As rochas podem degradar-se por meio de ações físicas e químicas, com a presença de água (ou outro líquido) e ar ou, ainda, pela ação conjunta de ambos (PINTO, 2011). O conjunto dessas ações, segundo Azambuja (1979), é denominado de intemperismo e pode ser classificado em intemperismo físico, que não altera a constituição química da rocha e intemperismo químico que, por meio de substâncias orgânicas ou inorgânicas dissolvidas na água, proveniente de precipitações e infiltrações, é capaz de transformar a rocha em solo. As variações de temperatura provocam trincas nas rochas, nas quais, posteriormente, ocorrerão reações químicas que darão lugar aos minerais de argila e areia (CABALA, 2007).

Em regiões onde o clima predominante é o tropical, como no caso do Brasil, o intemperismo químico prevalece sobre o intemperismo físico, em virtude da grande concentração de precipitações que tendem a contribuir para a realização de decomposições químicas (NOGAMI; VILLIBOR, 1983).

Os solos formados, a partir de produtos de intemperismo, no seu lugar de origem são chamados de solos residuais, uma de suas características é

gradação do tamanho de suas partículas, os grãos finos ficam na superfície e o diâmetro dos grãos aumenta de acordo com a profundidade. Os solos transportados ou sedimentares, como o próprio nome já indica, são gerados pelo transporte dos grãos de seu local de origem para outros lugares e podem ser classificados em vários grupos, a depender do seu modo de transporte (BRAJA, 2007). A Figura 1 apresenta um perfil típico de solo residual encontrado no estado do Rio de Janeiro.

Figura 1 - Perfil geotécnico do solo residual de gneiss do Rio de Janeiro.

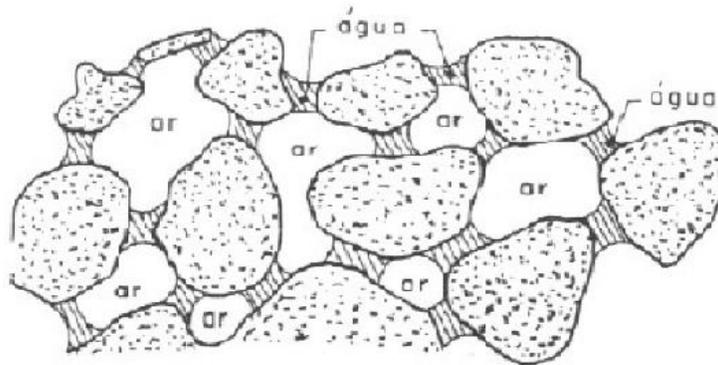


Fonte: Ortigão (2007).

A estrutura de um solo é resultante da agregação de partículas primárias (argila, areia e silte) com outros componentes minerais e orgânicos (calcário, sais, matéria orgânica, entre outros), os quais representam uma das suas principais características e pode ser classificado de acordo com a forma, tamanho e grau de desenvolvimento que exhibe (CAPECHE, 2008).

Segundo Blücher (1951), o solo apresenta uma configuração de estrutura porosa, conforme Figura 2, com a existência de vazios, preenchidos com ar e água, que, de um modo geral, permitem a movimentação das partículas. O comportamento do solo é influenciado pelo deslocamento das partículas sólidas entre si, o que altera as porcentagens em volume das suas fases constituintes (sólidos ar e água).

Figura 2 - Estrutura do solo



Fonte: Blücher (1951).

### 2.1.1 Granulometria do solo

O solo é constituído de partículas com variados tamanhos e, muitas vezes, não é fácil identificar as várias frações constituintes, apenas a olho nu (PINTO, 2011); para determinar sua granulometria, ou seja, o diâmetro dos grãos que os constitui faz-se necessária a utilização de ensaios específicos.

De acordo com o tamanho das partículas, o solo pode ser classificado em pedregulho, areia, silte ou argila. Os pedregulhos e areias representam a fração grossa do solo, são compostos, principalmente, por grãos de quartzo e possuem forma arredondada ou angular. São agregados inertes e não possuem coesão (GRANDE, 2003). Os siltes e argilas são considerados a fração fina dos

solos e, segundo Terzaghi e Peck (1961), são constituídos basicamente de um só mineral, gerado por intemperismo químico. São partículas friáveis, de forma achatada, angular, lamelar ou agulhas e tem sua origem na decomposição química das rochas.

A classificação de um solo não está condicionada somente à determinação de sua granulometria, pois as propriedades físicas das frações finas se devem a vários outros fatores, tais como limites de liquidez e plasticidade e compactação; no entanto a análise granulométrica é amplamente utilizada e existem várias escalas que são, mundialmente conhecidas, como as representadas na Figura 3.

Figura 3 - Escalas granulométricas, em milímetros, adotadas pela A.S.T.M, A.A.S.H.T.O e ABNT.

**D 2488- 09 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2009).**

PEDREGULHO		AREIA			SILTE ARGILA
G	F	G	M	F	
75	19	4,75	2,00	0,425	0,075

**AASHTO M145 (ASTM, 1993)**

PEDREGULHO	AREIA		SILTE ARGILA
	G	F	
75	2,00	0,425	0,075

**NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1995)**

PEDREGULHO				AREIA			SILTE	ARGILA
G	M	F	G	M	F			
60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06	0,002	

Fonte: Do autor (2017).

De um modo geral, um solo bem graduado, com quantidades equilibradas de frações finas e grossas, é o ideal para a utilização como material de fabricação de tijolos de solo cimento, porque demandam uma menor quantidade de cimento, visto que os espaços existentes entre os grãos maiores são preenchidos pelas partículas menores do próprio solo. Dessa forma, em vez de preencher os vazios, o cimento agirá, integralmente, na ligação entre os grãos.

### **2.1.2 Compactação dos solos**

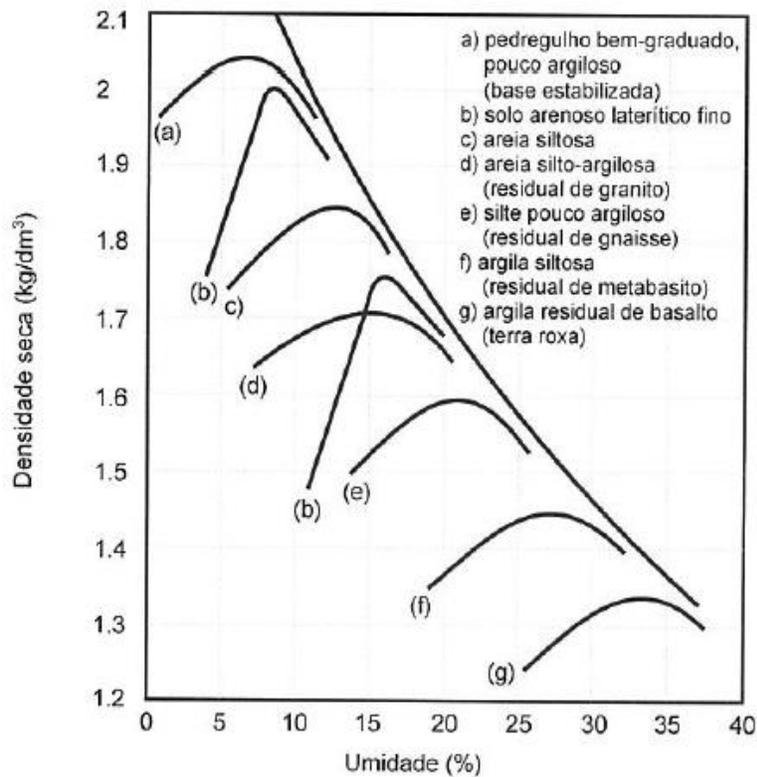
Entende-se por compactação do solo o processo pelo qual suas partículas são forçadas a agrupar-se mais estreitamente, pela redução dos vazios de ar, geralmente, por meios mecânicos (BLÜCHER, 1951).

A técnica de compactação teve início, em 1933 e é creditada ao engenheiro norte-americano R. Proctor, o qual, por meio de seus estudos, conclui que, ao se aplicar certa energia de compactação, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Quando a compactação ocorre com umidade baixa, o atrito entre as partículas é grande e não se consegue uma redução de vazios significativa. Em contrapartida, em umidades mais elevadas, a água promove um efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se de maneira mais compacta (PINTO, 2011).

Para uma energia de compactação constante, ao se adicionar água ao solo, sua densidade aumentará até certo ponto, denominando-se umidade ótima. Ao acrescentar teores de umidade acima do ótimo, a densidade voltará a reduzir, porque o excesso de água absorve parte da energia de compactação e redistribui ao sistema afastando as partículas (GRANDE, 2003).

Solos com maiores quantidades de finos, quando compactados, demandam maiores quantidades de água, para atingir a umidade ótima, em razão da maior área superficial do solo. Na Figura 4, são apresentadas curvas de compactação de diversos tipos de solos brasileiros.

Figura 4 - Curva de compactação dos diversos solos brasileiros.



Fonte: Pinto (2011).

Segundo Lins (1994), Rocha (1996) e Silva (2001) e a compactação gera uma nova configuração ao solo que afeta de maneira significativa as propriedades mecânicas, bem como a porosidade e permeabilidade do material.

De um modo geral, as propriedades mecânicas dos solos apresentam melhorias, quando eles são misturados com cimento e submetidos a processos de prensagem. O aumento na densidade da mistura faz com que o material apresente um melhor comportamento mecânico. Quanto maior a pressão de

compactação menor é o teor de cimento requerido, para que a mistura atinja altas resistências, depois de compactadas (SEGANTINI; CARVALHO, 2000).

### **2.1.3 Estabilização de solos**

Muitas vezes, para fazer uso do solo como material de construção, torna-se necessário imprimir-lhe atributos tais que, não poderiam ser obtidos, sem que houvesse antes um processo de modificação, na estrutura deste solo, conferindo-lhe as propriedades desejadas para determinado fim.

Nesse contexto, a estabilização dos solos tende a promover maior estabilidade dimensional, aumento da resistência mecânica, diminuição da permeabilidade, controle de fissuração por retração e secagem, resistência à erosão e abrasão superficial e, de um modo geral, aumento da vida útil do material (INGLES; METCALF, 1972).

Existem três métodos capazes de promover a estabilização do solo: o método mecânico, o físico e o químico (INGLES; METCALF, 1972).

A estabilização mecânica consiste na compactação do solo, por meio da aplicação de uma determinada carga, com isso, espera-se obter um aumento na resistência mecânica e possíveis reduções da permeabilidade e porosidade do material.

A estabilização física está mais relacionada com a textura do solo. Solos mal graduados, com grande incidência de partículas de uma mesma faixa de diâmetro, podem ser corrigidos, pela adição de outros tipos solos, buscando a otimização das frações de areia, silte e argila, o que gera um melhor empacotamento dos grãos.

A estabilização química ocorre, quando são misturados ao solo outros tipos de materiais capazes de promover reações físico-químicas entre o grão e o material ou, ainda, pode criar uma matriz que aglutina e cobre os grãos. Entre os

materiais utilizados como estabilizantes químicos, especial destaque é dado para o cimento, a cal, o betume e as fibras (SILVA, 2001).

Os fatores que influenciam o tipo ideal de estabilização a ser empregado são: viabilidade econômica, finalidade da obra, características dos materiais e propriedades do solo que necessita de correção (GUIMARÃES, 1998).

## 2.2 Cimento Portland

A obtenção do cimento tipo Portland acontece por meio da calcinação, em temperaturas próximas de 1500 °C, de uma mistura bem proporcionada de calcário (carbonato de cálcio) e argilas (silicatos de alumínio e ferro), com a adição de certa quantidade de gipsita (gesso com alto grau de finura), que atua no controle da pega e, ocasionalmente, de substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro. A temperatura elevada faz com que esses materiais reajam entre si, gerando produtos que, ao serem resfriados, aglomeram-se em pedaços com dimensões diversas, variando entre 2 mm e 20 mm. Essa aglomeração é denominada clínquer, que, ao ser moído, dá origem ao cimento Portland (SOUZA; RIPPER, 2001).

O clínquer Portland tem composição química específica e propriedades de cimento influenciadas pelas proporções dos compostos anidros, dos quais se podem destacar, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Principais compostos do cimento.

Compostos	Notações Químicas	Notações Químicas Condensadas
<b>Silicato Tricálcico</b>	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
<b>Silicato Bicálcico</b>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
<b>Aluminato Tricálcico</b>	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
<b>Ferro-Aluminato</b>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
<b>Tetracálcico</b>		
<b>Gipsita</b>	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	C <sub>5</sub> H <sub>2</sub>

Fonte: Souza e Ripper (2001).

A fim de um estudo completo de um componente de solo-cimento, torna-se importante o conhecimento de como os compostos encontrados no cimento se comportam, durante a reação de hidratação e como eles influenciam nas propriedades finais do produto.

As propriedades dos principais componentes do cimento em hidratação são:

C<sub>3</sub>S- responsável pela resistência inicial (3 a 28 dias), libera grande quantidade de calor e grande quantidade de hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>.

C<sub>2</sub>S- responsável pela resistência, em idades mais avançadas (mais de 28 dias), baixa liberação de calor, produz cerca de um terço da quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> produzida pelo C<sub>3</sub>S.

C<sub>3</sub>A- reação rápida, nos primeiros três minutos, libera maior quantidade de calor que todos os outros componentes, tem pouca influência na resistência e forte retração.

C<sub>4</sub>AF- praticamente não contribui para a resistência mecânica, apresenta boa resistência ao ataque por sulfatos.

Os mecanismos de hidratação do cimento são bastante complexos e envolvem fenômenos físico-químicos que podem ocorrer, em uma escala de segundos a anos, formando compostos com tamanhos diversificados, que variam de nanômetros a micrômetros (RAHIMI-AGHDAM; BAFIANT; ABDOLHOSSEINI QOMI, 2017).

Uma maneira simplificada e eficiente de monitorar a velocidade de hidratação do cimento é acompanhar o desenvolvimento das reações por meio de curvas de acompanhamento da evolução de calor (QUARCIONI, 2008). Para compósitos cimentícios, temperaturas de hidratação superiores a 50°C são consideradas ideais (SILVA; JOSÉ; BERALDO, 2004).

O conhecimento da natureza do cimento a ser empregado, em misturas de solo-cimento, é fator importante para pesquisas que visam ao melhoramento

desse tipo de material. Diferentes tipos de composições de cimento levam a comportamentos distintos da mistura, principalmente, quanto à fissuração por retração, ou seja, cimentos com elevada concentração de  $C_3A$  tendem a aumentar a retratibilidade do composto de solo-cimento, gerando fissurações que levam à diminuição da resistência do material.

Os principais tipos de cimento Portland, localizados no Brasil, encontram-se descritos no Anexo A. O prefixo CP acrescido dos algarismos romanos I a V, de acordo com o tipo de cimento, corresponde à sigla. As classes de resistência são representadas pelos números 25, 32 e 40, que correspondem à resistência à compressão do cimento, em MPA aos 28 dias de cura.

### **2.3 Solo-cimento**

O solo- cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante é um material com boa resistência à compressão, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2000).

Segundo Abiko (1980), a utilização de cimento como agente estabilizante para solos, tende a melhorar, ao longo do tempo, as propriedades do material, tais como resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica. Quando o cimento é incorporado ao solo, ocorrem reações de hidratação, nos silicatos e aluminatos presentes em sua constituição, formando um gel que preenche parte dos vazios e une os grãos adjacentes, aumentando a resistência inicial (SILVA, 2001). Concomitante a este processo, ocorrem reações iônicas, por meio da troca de cátions das estruturas argilominerais, presentes no solo, com os íons de cálcio, provenientes da hidratação do cimento. O solo torna-se, assim, mais granular, diminuindo a adesividade, assim como a sensibilidade às variações volumétricas.

A quantidade de cimento a ser adicionada ao solo, ao analisar sistemas de solo-cimento e solo cal, para componentes de alvenaria, deve corresponder para solos arenosos aos traços de 1:10, 1:12 e 1:14 (cimento- solo seco, em volume) e, para solos argilosos, a adição de 5% a 10% (em massa) de cal (ABIKO, 1980).

Os principais fatores que afetam a qualidade do solo-cimento são: o tipo de solo, o teor de cimento, o método de mistura e a compactação. Dentre esses fatores, o solo destaca-se como o elemento que mais influencia a obtenção de uma mistura com características adequadas (BLÜCHER, 1951). A partir da composição do solo, é possível verificar a viabilidade econômica de sua estabilização com cimento. A Highway Research Board (HRB, 1961) estabelece os limites de distribuição granulométrica para os quais os solos podem ser estabilizados, economicamente, com cimento. Observa-se, pelos dados contidos na Tabela 2, que a porcentagem máxima de partículas finas do solo deve ser de 50%.

Tabela 2 - Critérios para escolha do solo, segundo a HRB (1961).

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>REQUISITOS</b>
% de solo que passa na peneira n°4 (4,8 mm)	× 50%
% de solo que passa na peneira n°40 (0,42 mm)	De 15 a 50%
% de solo que passa na peneira n°200 (0,075mm)	Ö40%
<b>Índice de Plasticidade</b>	Ö18%

Fonte: HRB (1961).

Existe um consenso entre os autores, com publicações na área, de que quanto maior o teor de cimento maior a resistência à compressão, bem como a durabilidade do material, porém Ingles e Metcalf (1972), Pitta (1982) e Sabbag (1986) ressaltam que, se o teor de cimento for muito elevado e as condições de cura forem impróprias, é possível que ocorram fissuras no material, em consequência da retração por secagem.

A ABCP (2000) estabelece a sequência de mistura, para a produção de tijolos, blocos ou painéis com solo-cimento. Primeiramente o solo deve ser destorroado e peneirado, logo após, o solo e o cimento secos devem ser homogeneizados, em seguida, deve ser adicionada a água e, posteriormente, feita a prensagem.

Apesar de ser um procedimento, relativamente simples, o processo de mistura sofre influência de vários fatores que podem interferir, nas propriedades do material, implicando perda de resistência de até 50%, dentre os quais podemos citar a eficiência dos equipamentos e as condições ambientais do local onde a mistura é realizada (BLÜCHER, 1951).

A compactação, como já citado anteriormente, exerce um papel importante, na obtenção de um produto com características similares às estabelecidas pelas normas, portanto é indispensável conhecer o teor de umidade ótima para o qual se obtém a massa específica máxima da mistura. Em seus estudos, Silveira (1996) determina que quanto menor a massa específica seca da mistura de solo-cimento menor será a resistência mecânica alcançada, para o mesmo teor de cimento, no entanto o autor relata que solos arenosos alcançam maiores resistências, quando o teor de umidade da mistura está abaixo da umidade ótima, porém a durabilidade tende a ser menor.

Um importante índice para aferir a qualidade de compactação da mistura de solo cimento é a determinação do Grau de Compactação, que nada mais é que a relação entre a massa específica seca determinada para o material, e a massa específica seca aparente máxima determinada no ensaio de compactação Proctor Normal, o Grau de Compactação ideal situa-se entre 95% a 105% (BUENO; VILAR, 1999).

## 2.4 Tijolo solo-cimento

O tijolo ecológico ou de solo-cimento é feito de uma mistura de solo e cimento, que posteriormente são prensados, seu processo de fabricação não exige queima em forno à lenha, o que evita desmatamentos e não polui o ar, pois não lança resíduos tóxicos ao meio ambiente. Para o assentamento, pode ser utilizada, no lugar de argamassa comum, uma cola especial (SALA, 2006).

Diferentemente do tijolo de barro cozido ou tijolo cerâmico, que pelo processo de queima tem a resistência aumentada pela aproximação e redução da área específica das partículas, com conseqüente diminuição da porosidade do material, no tijolo de solo-cimento, a qualidade é função do empacotamento dos grãos do solo. Depois de compactados, o produto obtido tem baixa porosidade e alta densidade (FARIA, 1990; VLACK, 1973).

Segundo ABCP (2000), as principais vantagens do tijolo de solo-cimento são:

- a) Economia relacionada à disponibilidade do solo: uso intenso de material local, reduzindo custos com transporte, importação de materiais e fabricação;
- b) Potencial social: alocação de recursos humanos locais na fabricação de blocos ou painéis monolíticos;
- c) Obtenção de material com resistência à compressão simples de até 5MPa, com pequenas quantidades de cimento;
- d) Elevada durabilidade, verificada em testes de desgaste por ciclagem seca e úmida, em conseqüência de uma menor permeabilidade;
- e) A absorção e a perda de umidade do material não causam variações volumétricas consideráveis;
- f) O material não se deteriora quando submerso em água;
- g) Apresenta boas condições de conforto térmico e acústico;

- h) Ecologicamente correto: redução no consumo de energia elétrica pela minimização de uso de material cozido ou derrubada de árvores, evitando a liberação de gases poluentes ao meio ambiente.

Apesar das vantagens mencionadas, a fabricação de tijolos de solo-cimento requer controle tecnológico apurado para que o produto final seja de boa qualidade. É comum a ocorrência de patologias, após a estabilização, tais como: variações volumétricas por reações de água com aditivos, retrações e fissuras; degradação do material em razão da presença de sais solúveis em água, de matéria orgânica, de materiais expansivos ou partículas friáveis (feldspato e mica); propriedades diversificadas no lote produzido em decorrência da heterogeneidade da matéria-prima (FARIA, 1990).

O processo de fabricação do tijolo de solo-cimento, de acordo com Grande (2003), corresponde às seguintes etapas:

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

De acordo com a ABCP (1986), a dosagem do solo-cimento deve ser feita, por meio de ensaios laboratoriais, passando, a seguir, pela análise e interpretação dos resultados, com base em critérios pré-estabelecidos. O

resultado final consiste na fixação de três parâmetros: quantidade de cimento, quantidade de água e massa específica aparente seca máxima. Os dois últimos são parâmetros sujeitos a oscilações, em função das variações decorrentes do trabalho de campo e, por esta razão, passaram a ser tomados apenas como elementos de controle. Com isto, o objetivo da dosagem passou a ser tão somente a fixação da quantidade adequada de cimento. A quantidade de mistura deve ser dimensionada, para a produção de tijolos, aproximadamente, para 1 hora de funcionamento da prensa (ABCP, 2000). Na Tabela 3, está expressa a dosagem da mistura, recomendada pela ABCP (1986) e utilizada pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), em Ilha Solteira-SP, na dosagem de solo-cimento.

Tabela 3 - Teor de cimento.

<b>CLASSIFICAÇÃO H.R.B.</b>	<b>TEOR DE CIMENTO EM PESO (%)</b>
<b>A1- a</b>	5
<b>A1-b</b>	6
<b>A2</b>	7
<b>A3</b>	8
<b>A4</b>	10
<b>A5</b>	10
<b>A6</b>	12
<b>A7</b>	13

Fonte: ABCP (1986).

Nota: As descrições dos solos, de acordo com a classificação H.R.B, estão inseridas no Anexo B.

A Tabela 4 apresenta os critérios estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012c), que têm como objetivo estabelecer as condições exigíveis, para

a fabricação de tijolos maciços e blocos vazados de solo-cimento, utilizados em alvenaria.

Tabela 4 - Requisitos para escolha do solo.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>REQUISITOS</b>
% de solo que passa na peneira ABNT 4,75 mm (n° 4)	100%
% de solo que passa na peneira ABNT 0,075 mm (n° 200)	10 a 50%
<b>Limite de Liquidez</b>	Ö45%
<b>Índice de Plasticidade</b>	Ö18%

Fonte: NBR 10833 (ABNT, 2012c).

As misturas de solo-cimento devem ser preparadas de modo que os tijolos e blocos produzidos, a partir desse material, atendam aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012a), para o caso de tijolos, definidos na Tabela 5. A Tabela 6 apresenta a tipologia dos tijolos, de acordo com suas dimensões.

Tabela 5 - Características técnicas.

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
<b>Tolerâncias dimensionais</b>	Largura Altura Comprimento $\pm 1$ mm
<b>Resistência à compressão</b>	Valores médios Valores individuais Maior igual a 2,0 MPa Maior igual a 1,7 MPa
<b>Absorção de água</b>	Bloco e Tijolos Menor igual a 20% para valores médios Menor igual a 22% para valores individuais

Fonte: NBR 8491 (ABNT, 2012a).

Tabela 6 - Características dimensionais.

<b>MATERIAL</b>	<b>TIPOS</b>	<b>COMPRIMENTO (mm)</b>	<b>LARGURA (mm)</b>	<b>ALTURA (mm)</b>
<b>Tijolos</b>	A	200	100	50
	B	240	120	70

Fonte: NBR 8491(ABNT, 2012a).

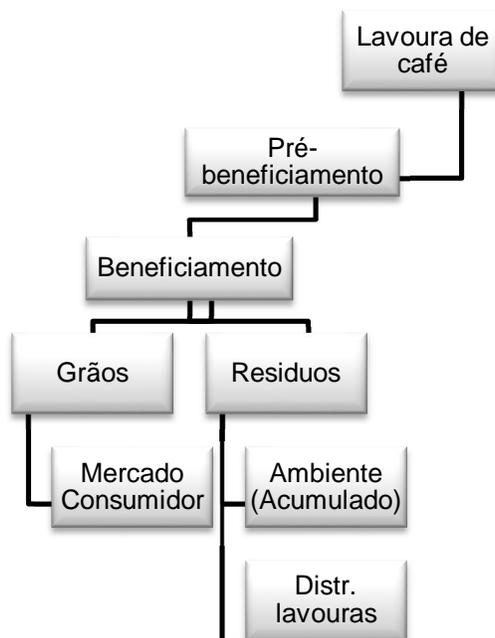
## 2.5 Café

O cultivo do café foi introduzido no Brasil, a partir do século XVIII, chegando ao Pará e estado vizinho, pela Guiana Francesa. Em 1774, chegou ao Rio de Janeiro, espalhando-se pelo Vale do Paraíba. No ano de 1825, foi inserido em São Paulo e, posteriormente, em Minas Gerais (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ - IBC, 1981).

Em 1840, o Brasil atingiu a liderança do mercado cafeeiro mundial, com grande deslocamento de escravos de outras culturas, do cultivo da cana-de-açúcar para as regiões cafeeiras (VENTURIM, 2002).

Graças à magnanimidade da produção, a atividade cafeeira, no Brasil, gera enormes quantidades de resíduos. No setor produtivo, o principal resíduo é a casca de café, obtido na fase de processamento e beneficiamento dos frutos, conforme Figura 5 (DULTRA, 2013).

Figura 5 - Sistema convencional de produção de café.



Fonte: Venturim (2002).

O processo de secagem mais comum é feito ao sol ou em secadores mecânicos e produz um resíduo denominado casca ou palha de café, mas o beneficiamento, por via úmida do café, tem sido intensificado, nos últimos anos, gerando também a polpa do café (BARCELOS et al., 2013).

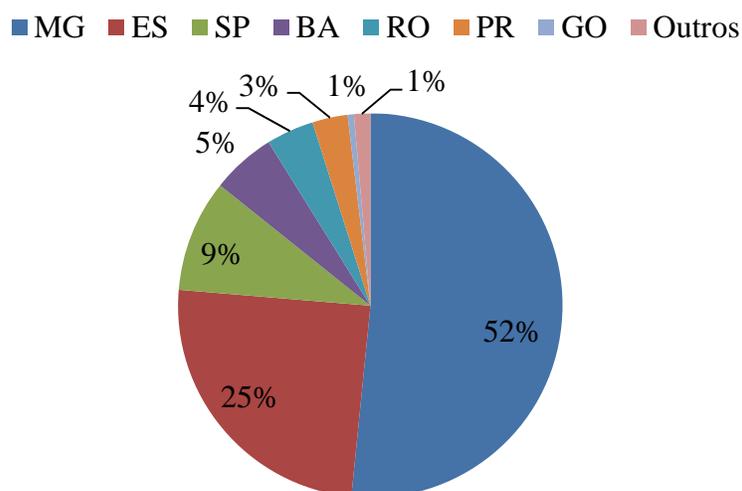
A diferença entre a casca e a polpa de café, segundo Barcelos e Gonçalves (2011), é a presença ou não do endocarpo ou pergaminho. A casca ou palha do café é composta de exocarpo (casca), mesocarpo (polpa ou mucilagem), endocarpo (pergaminho); e a polpa de café é composta por epicarpo (casca) e mesocarpo (polpa ou mucilagem), o pergaminho que representa de 28,7% a 38,8% da casca, é o componente fibroso (TEIXEIRA, 1999).

Na safra de 2015, a produção de café, no Brasil, foi de 43,24 milhões de sacas de café beneficiado e, apenas em Minas Gerais, a produção atingiu 22,3

milhões de sacas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015). Houve queda na produção em comparação com os anos anteriores de 2012, 2013 e 2014.

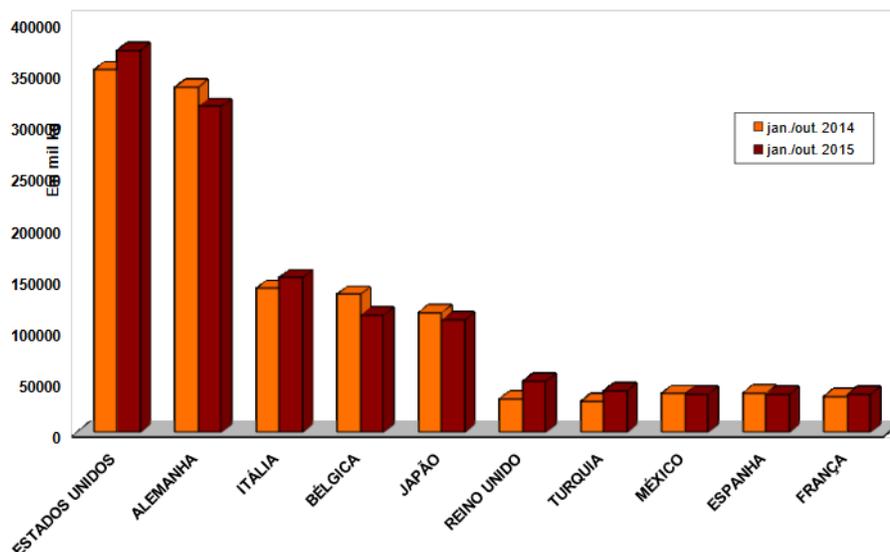
Os principais estados produtores de café são Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná e Goiás. A Figura 6 apresenta a representação participativa de cada estado na safra de 2015. Com relação às exportações, a Figura 7 apresenta os principais consumidores do café brasileiro, no ano de 2015, dentre os quais se destacam os Estados Unidos, com um volume de importação de 370 toneladas de café beneficiado.

Figura 6 - Participação percentual na produção de café por UF.



Fonte: CONAB (2015).

Figura 7 - Exportação brasileira de café (em mil kg).



Fonte: CONAB (2015).

A relação de café beneficiado/casca é de, aproximadamente, 1:1 (BÁRTHOLO et al., 1989), esse resíduo retorna, em parte, às lavouras de café como adubo orgânico e fonte de potássio (K) ou se perde por não ter utilização (BARCELOS et al., 2013).

Os resíduos gerados, particularmente nas atividades agrícolas, quando não tratados corretamente, acarretam prejuízos imensos ao meio ambiente e à sociedade, aumentando os riscos à saúde humana e de outros seres vivos (BARBOSA; LANGER, 2011). Uma vez que o planeta está vivendo a era da sustentabilidade, deve-se, portanto buscar o uso racional dos recursos naturais sem degradação dos ecossistemas (MACEDO; TAVARES, 2010).

## 2.6 Conforto Térmico e Propriedades Térmicas

Segundo a American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 1993), o conforto térmico pode ser definido

como um sentimento que exprime satisfação com a temperatura do ambiente em que o indivíduo está presente.

Os principais fatores que influenciam o conforto térmico são: temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade e velocidade do vento. O conforto térmico de uma construção dependerá de elementos como o calor interno produzido, o calor causado pela incidência de sol na edificação, o calor trocado, por meio de condução por entre as paredes e coberturas e as trocas térmicas de aquecimento e resfriamento provocadas pela circulação do ar (SANTOS, 2014).

As paredes de terra crua apresentam um comportamento interessante não apenas pelo seu isolamento térmico, mas pela capacidade de gerir o calor que recebem, seja de fonte solares ou outras, com respostas diferidas ao longo do tempo (ARAÚJO, 2015). Dessa forma, é muito importante observar a condutividade térmica dos materiais que constituem uma edificação, pois quanto menor for o seu valor maior será a resistência térmica do material e menor será a transmissão de calor.

Para avaliar o conforto térmico de um ambiente, é preciso conhecer e entender alguns conceitos que envolvem a determinação de propriedades térmicas nos materiais. Considerando a definição básica de calor como o trânsito de energia, provocada por diferenças de temperatura, na qual o fluxo de calor vai de uma região mais quente para uma região mais fria, pode-se descrever a condutividade térmica como o processo de troca de energia entre sistemas, ou parte de um sistema, em diferentes temperaturas, que ocorre pela interação molecular nas quais as moléculas de alto nível energético transferem energia por impacto a outras de menor nível energético. Esse choque gera uma onda de calor, cuja velocidade de propagação dependerá da natureza do material (BRAGA FILHO, 2004; INCROPERA, 2008).

A lei básica da condução de calor é definida pelos experimentos de Fourier e é dada pela Equação 1.

$$K = \frac{q_k \cdot A}{dT} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

K - é a condutividade térmica do material (W/(m.K)).

$q_k$  - é o fluxo de calor (W).

A - é a área perpendicular ao fluxo de calor (m<sup>2</sup>).

dT: Temperatura (°C ou K).

dx - Comprimento que atravessa o fluxo de calor (m).

Os materiais de construção, em virtude da condutividade térmica, podem ser utilizados, para proporcionar conforto térmico aos ambientes em que são aplicados. A Tabela 7 apresenta valores de condutividade térmica para alguns dos materiais mais empregados na construção civil.

Tabela 7 - Condutividade térmica de alguns materiais de construção.

<b>Material</b>	<b>Densidade ( ) Kg/ m<sup>3</sup></b>	<b>Condutividade Térmica W/mK</b>
<b>Argamassa comum</b>	1800 a 2100	1,15
<b>Argamassa de gesso comum</b>	1200	0,70
<b>Argamassa celular</b>	600 a 1000	0,40
<b>Placas de fibrocimento</b>	1800 a 2200	0,95
<b>Concreto normal</b>	2200 a 2400	1,75
<b>Gesso projetado comum</b>	1100 a 1300	0,50
<b>Placa de gesso comum</b>	750 a 1000	0,35
<b>Lã de rocha</b>	...20 a 200	0,045
<b>Argila expandida</b>	400	0,16
<b>Vidro Comum</b>	2700	1,10
<b>Fibra de vidro</b>	0,00015	0,04
<b>Tijolo</b>	1000 a 1300	0,70
<b>Telhas</b>	1300 a 1600	1,00
<b>Granito</b>	2300 a 2900	3,00
<b>Mármore</b>	2600	2,90
<b>Poliestireneo (styrofoam)</b>	25 a 40	0,035
<b>Poliuretano</b>	30 a 40	0,030
<b>Madeira</b>	800 a 1000	0,29
<b>Placas prensadas</b>	450 a 550	0,12

Fonte: Correia (2009).

A NBR 15220-parte 3 (ABNT, 2005c) apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro e estabelece as diretrizes, para a avaliação de desempenho térmico, em habitações unifamiliares de interesse social. Diante da proposta deste estudo, é importante observar os limites estabelecidos no Quadro 1, que versa sobre os valores máximos de transmitância térmica (U), atraso térmico ( ) e Fator Solar (FS<sub>o</sub>).

Quadro 1 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.

Vedações externas		Transmitância térmica ó U W/m <sup>2</sup> .K	Atraso térmico ó Horas	Fator solar-FSo %
Paredes	Leve	UÖ3,00	Ö4,3	FSo Ö5,0
	Leve refletora	UÖ3,60	Ö4,3	FSo Ö4,0
	Pesada	UÖ2,20	Ö6,5	FSo Ö3,5
Coberturas	Leve isolada	UÖ2,00	Ö3,3	FSo Ö6,5
	Leve refletora	UÖ2,30.FT	Ö3,3	FSo Ö6,5
	Pesada	UÖ2,00	Ö6,5	FSo Ö6,5
NOTAS: 1 Transmitância térmica, atraso térmico e fator solar (ver 02:135.07-001/2). 2 Aberturas efetivas para ventilação são dadas, em percentagem da área de piso, em ambientes de longa permanência (cozinha, dormitório, sala de estar). 3 No caso de coberturas (este termo deve ser entendido como conjunto telhado mais ático mais forro), a transmitância térmica deve ser verificada para o fluxo descendente. 4 O termo ãáticoö refere-se à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.				

O roteiro de cálculo das propriedades, elencado na NBR 12220- Parte 3 (ABNT, 2005c), está disposto na NBR 12220- Parte 2 (ABNT, 2005b), mas, para tanto, é preciso revisar os conceitos que envolvem os parâmetros utilizados na determinação dessas propriedades.

Resistência Térmica: é a resistência oferecida pelo material à troca de calor, é proporcional à espessura e inversamente proporcional à condutividade térmica do material (Equação 2).

$$R = \frac{e}{h} \quad \text{Equação (2)}$$

R: resistência térmica (m<sup>2</sup>.K/W).

e: espessura da camada do material (m).

h: condutividade térmica do material (W/(m.K)).

Transmitância Térmica - é o fluxo de calor incidente transmitido pelo meio (INCROPERA, 2008), conforme Equação 3.

$$U = \frac{1}{R_t} \quad \text{Equação (3)}$$

$R_t$ : resistência térmica ( $m^2.K/W$ ).

$U$ : transmitância térmica ( $m^2.K/W$ ).

A Equação 4 representa a Capacidade Térmica, que corresponde ao calor necessário, para variar a temperatura do material em  $1^\circ C$  (ou 1K).

$$C = \frac{V}{\rho} \cdot \rho \cdot c = V \cdot c$$

Equação (4)

Em que:

$K$ : condutividade térmica ( $W/(m.K)$ ).

$R$ : resistência térmica ( $m^2.K/W$ ).

$e$ : espessura da camada do material (m).

$c$ : calor específico do material.

$\rho$ : densidade aparente do material.

Atraso térmico: defasagem de evolução da temperatura interna, em relação à temperatura externa, é associado à inércia térmica da envoltória. Quanto maior a inércia térmica maior o atraso no fluxo de calor. Em uma placa homogênea (constituída de um único material), com espessura  $e$  e submetido a um regime térmico variável e senoidal, com período de 24 horas, o atraso térmico pode ser estimado pelas expressões definidas pela norma da ABNT (2005b) (Equações 5 e 6).

$$= 1,382 \cdot \frac{\overline{t_{i,e}}}{\overline{t_{e,i}}} \quad \text{Equação (5)}$$

$$= 0,7284 \cdot \frac{\overline{t_{i,e}}}{\overline{t_{e,i}}} \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

$\tau$ : é o atraso térmico.

$e$ : espessura da camada do material (m).

$\rho$ : densidade aparente do material.

$c$ : calor específico do material.

$R_t$ : resistência térmica.

$C_t$ : capacidade térmica do material.

Fator de ganho solar: fração de radiação solar incidente que é absorvida e transmitida pela envoltória. FS é o quociente da taxa de radiação solar transmitida por meio de um componente opaco pela taxa de radiação solar total incidente sobre a sua superfície externa (ABNT, 2005c) (Equação 7).

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \tau \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

FS<sub>o</sub>: fator solar em elementos opacos (%).

$U$ : transmitância térmica (m<sup>2</sup>.K)/W).

$\alpha$ : absorptância à radiação solar- função da cor.

A preocupação com o conforto térmico, em construções habitacionais, impulsiona uma série de pesquisas, que visam a melhorar a qualidade dos materiais empregados em coberturas e paredes das edificações, dentre elas,

podem-se citar estudos relacionados à inserção de materiais lignocelulósicos na fabricação de produtos cerâmicos.

## **2.7 Mistura de solo-cimento e partículas vegetais**

A crescente preocupação com utilização racional de recursos naturais faz com que técnicas de construção, consideradas mais ecológicas por provocarem menores impactos ambientais, ganhem espaço tanto no mercado consumidor quanto dentro do campo de pesquisas. Nesse contexto, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas, no âmbito da utilização do solo estabilizado com cimento, para a produção de materiais de construção mais sustentáveis.

Ferrari et al. (2014) analisaram a viabilidade de utilização do solo da região do Arenito Caiuá, localizado no Noroeste do Paraná, com vista à produção de blocos vazados de solo-cimento. Concomitante a essa análise, os autores avaliaram, também, os efeitos da substituição parcial do cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar na resistência à compressão e da absorção de água dos blocos com idades de 7, 14, e 21 dias. Foram produzidas seis formulações diferentes, com a porcentagem de cimento variando de 6% a 8% e a porcentagem de cinza em substituição do cimento variando entre 10% e 20%. Com base nos resultados encontrados, os autores concluíram que o solo da região do Arenito Caiuá atende aos limites estabelecidos na NBR 10833 (ABNT, 2012c) e que o teor 7% de cimento, adicionado à mistura, apresentou os melhores resultados, para a resistência à compressão em todas as idades. Quanto à incorporação das cinzas, em substituição parcial do cimento, os resultados demonstraram que a resistência à compressão diminuiu, em todos os tratamentos, porém o teor de 10% atingiu aos requisitos mínimos da norma, com idade de 21 dias, verificando, assim, a possibilidade de sua utilização.

Siqueira e Holanda (2015) estudaram a utilização de resíduos de grits, provenientes da indústria de papel e celulose, em substituição parcial do

cimento, para a fabricação de tijolos de solo-cimento. Foi avaliada a atividade pozolânica do material, os resíduos foram incorporados, a partir de teores variando de 0% a 30%, em relação ao percentual de cimento da mistura. Os resultados obtidos demonstraram que o grits não é considerado um material pozolânico, porém atua como material de enchimento, melhorando o empacotamento dos grãos, reduzindo, assim, a quantidade de vazios, o que implica ganhos de resistência. Os autores concluíram que a substituição de cimento por grits é viável até um percentual de 20%, acima disso, a absorção de água é aumentada e ocorre uma redução da resistência à compressão.

Os efeitos da adição de casca de arroz, em misturas de solo-cimento, foram avaliados por Milani e Freire (2006). Os autores buscaram estabilizar dois tipos de solos diferentes, arenoso e argiloso, a partir da inserção de composições variadas de cimento e casca de arroz. Foram utilizados teores de 8% e 12% da combinação de cimento e casca de arroz, para o solo arenoso e teores de 8%, 12%, 14% e 18% da mesma combinação, para estabilizar o solo argiloso. A substituição de cimento por casca de arroz ocorreu de 0% até 60% em incrementos de 10%. A umidade ótima e massa específica seca máxima de cada mistura foram determinadas, com base no ensaio de Proctor Normal. A partir dos parâmetros encontrados, foram produzidos corpos-de-prova que passaram pelos ensaios de compressão diametral, compressão simples e absorção de água. Os resultados demonstraram que a massa específica aparente seca máxima, a resistência à compressão diametral e resistência à compressão simples decresceram, conforme o aumento da casca de arroz na mistura, em contrapartida, o teor de umidade ótimo e absorção de água elevaram-se, conforme o acréscimo de casca de arroz. As misturas com solo arenoso foram as que obtiveram resultados mais promissores, sendo destacada a adição de 12% de cimento e 12% da combinação de cimento e casca de arroz nas proporções de 80% de cimento e 20% de casca de arroz.

Ashour, Korjenic e Korjenic (2015), em seus estudos, avaliaram os efeitos da incorporação de palha de trigo e cevada, nas propriedades térmicas de tijolos fabricados, a partir da mistura estabilizada de solo com cimento e gesso. Os resultados indicaram que a condutividade térmica de todos os tratamentos sofreram decréscimos, conforme aumento nos teores de palhas nas misturas e a palha de cevada apresentou melhor isolamento térmico, em contrapartida, teores maiores de cimento e gesso implicaram valores de condutividade térmica mais elevada.

Nascimento (2011) desenvolveu tijolos de solo-cimento reforçados com fibra de casca de coco e avaliou, dentre outras propriedades, o isolamento térmico deste material. Do ponto de vista térmico, todos os tratamentos, em que as fibras de coco foram inseridas, apresentaram valores de isolamento térmico maior que o tratamento controle, as outras propriedades estudadas, resistência à compressão, absorção de água, massa específica, também, apresentaram valores satisfatórios, indicando, assim, a viabilidade dessas incorporações.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Material**

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram recebidos, processados e acondicionados na Unidade Experimental de Painéis de Madeira- UEPAM da Universidade Federal de Lavras, conforme descrito a seguir.

##### **3.1.1 Casca de café**

A casca de café utilizada pertence à espécie *Coffea arabica* L. e foi obtida, na cidade de Machado, MG. A casca foi adquirida, a partir da secagem dos grãos em secadores mecânicos.

As matérias vegetais foram trituradas, em moinho de martelo e, posteriormente peneiradas, foram utilizados os resíduos que passam na peneira 40 mesh (abertura de malha 0,420 mm) e ficaram retidos, na peneira 60 mesh (abertura de malha 0,250 mm), visando a uma melhor homogeneização das partículas com os demais componentes da mistura. Após o processo de trituração, os resíduos foram imersos, em solução de cal hidratada CH III, concentrada a 5% por um período de 24 horas, baseado no trabalho desenvolvido por Serrano e Castro (1985).

Posteriormente os materiais foram lavados e secos em estufa, por um período de 48 horas, à temperatura de 80 °C. De acordo com Zucco (1999), este procedimento torna-se necessário para evitar a incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o aglomerante mineral.

##### **3.1.2 Solo**

O solo foi extraído, no campus da Universidade Federal de Lavras e as coordenadas geográficas do ponto de localização são, respectivamente, 21°22'38"S de latitude e 44° 58'55"W de longitude. Depois da extração, o solo

foi previamente destorroado e peneirado, a fim de eliminar o máximo possível de resíduos orgânicos e acondicionado de forma a ficar livre da ação de intempéries.

### 3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Portland do tipo CP II F 32, de boa qualidade. Seu emprego justificou-se por ser o material mais utilizado, no mercado local, de fácil aquisição e baixo custo.

### 3.2 Caracterização do Solo

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados, no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia da UFLA, conforme prescrições das normas citadas, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Ensaios de caracterização do solo.

<b>Ensaios</b>	<b>Normas</b>	<b>Finalidade</b>
<b>Granulometria por peneiramento e sedimentação</b>	NBR 7181 (ABNT, 1984b)	Determinar a curva granulométrica do solo.
<b>Massa específica</b>	NBR 6508 (ABNT, 1984a)	Obter a massa específica dos grãos de solo.
<b>Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade</b>	NBR 6459 (ABNT, 2016b) NBR 7180 (ABNT, 2016c)	Determinar a consistência do solo.
<b>Umidade</b>	NBR 6457 (ABNT, 2016a)	Teor de umidade do solo
<b>Ensaio de Compactação Proctor Normal</b>	NBR 7182 (ABNT, 1986)	Determinar a massa específica aparente máxima e o teor de umidade ótimo.

Fonte: Do autor (2017).

### 3.2.1 Análise química das partículas

Para análise química das partículas de casca de café, foi utilizado o material que passou na peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh. O material foi armazenado em local com temperatura e umidade constantes de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  até a obtenção de massa constante. As análises seguiram as metodologias citadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Ensaios para composição química.

Ensaio	Normas
Teor de lignina	NBR 7989 (ABNT, 2010a)
Teor de extrativos totais	NBR 14853 (ABNT, 2010b)
Cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2003)
Holocelulose	$H(\%) = 100 - \% \text{ Lignina} - \% \text{ Extrativos Totais} - \% \text{ Cinzas}$

Fonte: Do autor (2017).

### 3.2.2 Densidade das partículas

A densidade básica das partículas foi determinada, utilizando o método de Medição Direta do Volume por Cilindro Graduado, com amostras imersas em água em seis repetições. As amostras foram saturadas em recipiente apropriado com água destilada. Após a saturação, foram pesadas cerca de 10g por amostra e colocadas em provetas graduadas.

O volume da amostra foi dado pela diferença entre o volume final e o inicial da proveta. Depois dessa determinação, as amostras foram secas em estufa à temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até peso constante. A densidade básica foi calculada pela Equação 10:

$$D_b = \frac{m}{V} \quad \text{Equação (10).}$$

Em que:

Db: é a densidade básica da partícula.

Ms: é a massa da amostra seca em estufa.

Vf: é o volume final da proveta com a amostra saturada.

Vi: volume inicial da proveta sem a amostra saturada.

### **3.3 Delineamento experimental**

Em todos os ensaios e teste foram avaliados os tijolos com partículas de casca de café, com quatro proporções diferentes, em substituição ao cimento, as quais foram de 5%, 10%, 15% e 20% e tijolos isentos de partículas, conforme Figura 8. As porcentagens de partículas incorporadas na mistura foram definidas, a partir dos resultados obtidos em outros estudos, que avaliaram a influência da substituição de cimento por resíduos vegetais em tijolos de solo-cimento, como os realizados por Ferreira, Gobo e Cunha (2008) e Milani e Freire (2006) os quais analisaram a influência da substituição de cimento por casca de arroz e cimento por casca de arroz e casca de braquiária, respectivamente. Nas propriedades de tijolos de solo-cimento, ambos os autores encontraram resultados satisfatórios, para teores de substituição inferiores a 20%.

Figura 8 - Delineamento Experimental.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.4 Produção dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-partículas

Os tijolos foram produzidos na Unidade Experimental de Painéis de Madeira- UEPAM da Universidade Federal de Lavras, conforme as etapas descritas abaixo.

### **3.4.1 Determinação do traço**

A quantidade de cimento a ser adicionada na mistura foi definida, a partir da caracterização do solo a ser utilizado e sua classificação, de acordo com a HRB (1961), contida no Anexo B, como recomendado na ET-35 publicada pela ABCP (1986).

### **3.4.2 Preparação, prensagem e cura e dos tijolos**

Com base na classificação do solo segundo HRB (1961), foi escolhido o percentual de cimento a ser adicionado na mistura. Os tratamentos foram, então, definidos, considerando-se um percentual de 10% de cimento, em relação à quantidade de solo, para o tratamento controle e conseqüente substituição do cimento por partículas de casca de café, em teores de 5%, 10%, 15% e 20% do valor do total de cimento na mistura.

As quantidades dos materiais empregados foram estabelecidas, com base nos valores encontrados, no ensaio de compactação (massa específica aparente seca e teor de umidade ótima) de cada tratamento e estão representadas na Tabela 10. O processo de produção dos tijolos seguiu os passos ilustrados no esquema das Figuras 9 e 10.

Tabela 10 - Quantidade dos materiais utilizados para confecção de um tijolo.

<b>Tratamento</b>	<b>Solo (g)</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Cimento (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Casca de café (g)</b>
<b>T0</b>	962,55*	1107,45*	207,00*	343,62* **	-
<b>T1</b>	925,12	1064,35	189,00	358,11	9,95
<b>T2</b>	919,77	1058,23	178,02	360,00	19,78
<b>T3</b>	903,73	1039,77	165,20	363,43	29,15
<b>T4</b>	866,30	996,71	149,04	342,80	37,26

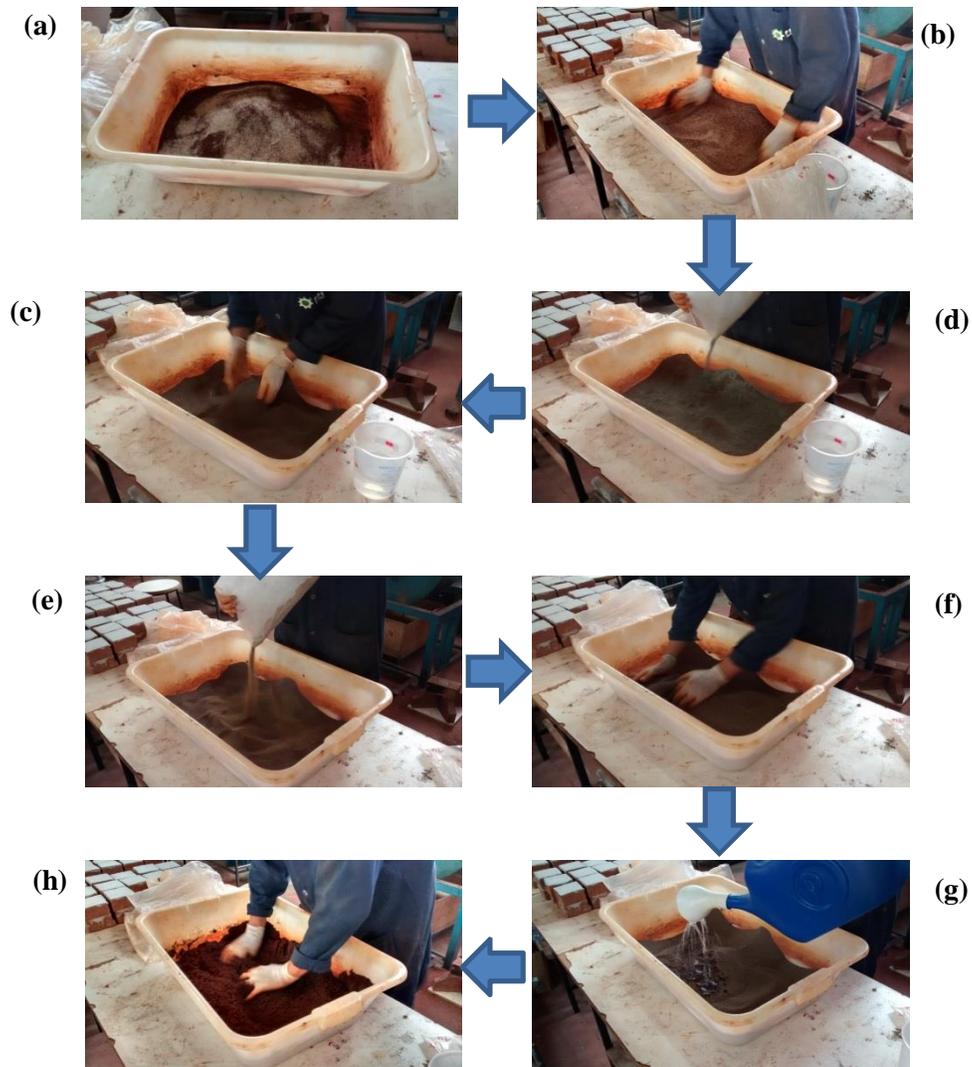
Fonte: Do autor (2017).

Nota:

\*Em todos os tratamentos foi considerada uma perda, no processo produtivo de 15%, para todos os materiais utilizados.

\*\*Na determinação do valor de água a ser adicionado na mistura, foi levada em consideração a umidade do solo e areia a qual foi subtraída do valor tabelado.

Figura 9 - Esquema de produção dos tijolos.



Fonte: Do autor (2017).

Legenda: (a) deposição de solo e areia; (b) homogeneização solo e areia; (c) adição de cimento; (d) homogeneização solo e cimento; (e) adição de casca de café; (f) homogeneização solo, cimento e casca de café; (g) adição de água; (h) homogeneização da mistura.

Realizada a homogeneização de todos os componentes, a mistura foi prensada, por uma adaptação de uma prensa manual (FIGURA 10), dentro de

um prazo máximo de uma hora (ABCP, 2000). Os tijolos confeccionados obedeceram às dimensões estabelecidas, para o Tipo II, de acordo com a norma NBR 8491 (ABNT, 2012a), com dimensões de 20 x 10 x 5 cm (comprimento x largura x altura) e foram prensados, a partir da pressão padrão de moldagem dos tijolos de solo-cimento, igual a 2MPa (SILVA, 2005).

Figura 10 - Prensagem dos tijolos.



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) colocação da mistura na forma; (b) prensagem da mistura.

A cura ocorreu, nos primeiros sete dias de idade, por meio de ciclos de molhagem, cerca de três vezes ao dia (FIGURA 11). Após a cura, os tijolos permaneceram estocados, em local coberto, até a data dos ensaios.

Figura 11 - Processo de cura dos tijolos.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.5 Avaliação dos tijolos

Os tijolos produzidos foram submetidos aos ensaios descritos, para determinação de suas propriedades, conforme programação demonstrada na Tabela 11.

Tabela 11 - Ensaios de caracterização dos tijolos.

Ensaio	Procedimento	Idade dos tijolos (dias)	Nº de tijolos ensaiados por tratamento
<b>Análise Dimensional</b>	NBR 8492 (ABNT, 2012b)	14,28,56	7 (total 105)
<b>Resistência à compressão</b>	NBR 8492 (ABNT, 2012b)	14, 28, 56	4 ( total 60)
<b>Absorção de água</b>	NBR 8492 (ABNT, 2012b)	14, 28, 56	3 (total 45)
<b>Durabilidade Isolamento Térmico</b>	NBR 13554 (ABNT, 2012e)* Santos et al. (2011) adaptado por Bertolini (2014)	56 (início) 28	3 (total 15) 3 (total 15)

Fonte: Do autor (2017).

\* Ensaio modificado: realizado em tijolos sem escovação, uma vez que as solicitações de abrasão superficial, em paredes, são menos severas que as previstas nas demais utilizações de misturas de solo-cimento (estradas, por exemplo).

### 3.5.1 Análise dimensional

A análise dimensional consistiu na determinação das dimensões dos tijolos (comprimento, largura e altura), para todos os tratamentos produzidos, com uma tolerância máxima de 1 mm nas variações dimensionais supracitadas, conforme estabelece a NBR 8492 (ABNT, 2012b).

### 3.5.2 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado, conforme a NBR 8492 (FIGURA 12), em três tijolos diferentes de cada tratamento, com idades de 14, 28 e 56 dias. Os tijolos foram levados à estufa, em temperatura variando de 105°C a 110° C, até a constância de massa, obtendo-se, assim, a massa do tijolo seco em estufa. Posteriormente os tijolos foram imersos em água por um período de 24 horas. Decorrido esse prazo, os tijolos foram retirados, enxugados superficialmente e, novamente pesados, obtendo-se sua massa saturada. A diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca correspondeu ao valor de sua capacidade total de absorção de água. Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela seguinte Equação 11.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100 \quad \text{Equação (11).}$$

Em que:

*M*<sub>1</sub>- massa do tijolo seco em estufa.

*M*<sub>2</sub>- massa do tijolo saturado.

Absorção de água em porcentagem.

A absorção média é obtida pela média aritmética de três repetições, para cada lote e não deverá ser maior que 20% nem conter valores individuais maiores que 22%.

Figura 12 - Ensaio de absorção de água.



Fonte: Do autor (2017).

Legenda: (a) secagem dos tijolos em estufa; (b) imersão em água.

### 3.5.3 Ensaio de compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram separados 4 tijolos de cada tratamento, com 14, 28 e 56 dias de idade. De acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012b), os tijolos foram seccionados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão e, posteriormente, as duas metades foram unidas por uma camada fina de argamassa pré-fabricada, de 2 a 3 mm de espessura, aguardando o endurecimento da pasta.

As faces dos tijolos que iriam ficar em contato com a prensa receberam acabamento por uma camada de 2 a 3 mm de pasta de argamassa pré-fabricada. Esse procedimento durou cerca de 24 horas. Após endurecimento das camadas de regularização, os tijolos foram imersos em água, por um período de 24 horas e, decorrido esse intervalo, eles foram enxugados superficialmente e levados

para serem ensaiados, (FIGURA 13), no Laboratório de Resistência dos Materiais, pertencente ao Departamento de Engenharia da UFLA. A aplicação da carga ocorreu de maneira uniforme à razão de 500N/s (50 kgf/s), com o aumento da carga até que ocorresse a ruptura do corpo-de-prova.

Os valores individuais da resistência à compressão foram obtidos dividindo-se a carga máxima encontrada no ensaio pela média das áreas das duas faces trabalhadas.

A resistência média à compressão foi obtida, por meio da média aritmética das quatro repetições, realizada para cada lote de tijolos e não deverá apresentar valor menor que 2,0 MPa e nem valores individuais menores que 1,7 MPa.

Figura 13 - Tijolos de solo-cimento no ensaio de compressão.



Fonte: Do autor (2017).

### **3.5.4 Ensaio de durabilidade**

O ensaio de durabilidade foi realizado, de acordo com a NBR 13554 (ABNT, 2012e), em três amostras de cada tratamento, na idade de 56 dias, duas delas foram reservadas para a variação de peso e uma para aferir a variação de volume e absorção de água.

A durabilidade do material é avaliada pela determinação da perda de massa, variação de umidade e volume, provocados no material por meio de ciclos de 48 h consecutivos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-cimento.

### **3.5.5 Conforto térmico**

O ensaio, para a determinação da propriedade de condutividade térmica, foi realizado no Laboratório da Unidade Experimental de Painéis de madeira (UEPAM) da UFLA.

O equipamento empregado (FIGURA 14) é uma adaptação do método da coluna fracionada modificado, descrito por Santos et al. (2011) e adaptado por Bertolini (2014). A câmara utilizada no ensaio é composta por painéis de madeira reconstituída e, para vedação, foram utilizadas placas de isopor de 15 mm de espessura, manta aluminizada do modelo Fresh foil Premium, constituída de cinco camadas (alumínio/polietileno/reforço/ polietileno/alumínio), com reflexão aproximada de 90% e fita adesiva aluminizada, conforme o trabalho Carvalho (2012). O equipamento é aquecido por uma lâmpada incandescente com temperatura controlável e variável até 90°C.

As perdas de calor lateral são levadas em consideração, o cálculo da condutividade térmica ocorre, quando o sistema atinge um estado estacionário de condução de calor, as temperaturas são registradas por termopares por meio de um equipamento Data Collector, modelo IM DC 100-01E, de fabricação da Yokogawa, com disponibilidade para 20 canais de conexão. Os corpos-de-prova

foram ensaiados isoladamente, o material foi exposto à temperatura ambiente, em torno de 50°C. A taxa de aquecimento foi de 1°C/min. e o ciclo de ensaio, para cada tratamento, foi de aproximadamente 3 horas.

O ensaio forneceu os valores da temperatura, na base do padrão (lâmpada incandescente); e temperaturas, na base e no topo do corpo-de-prova (°C), obtidas pelos termopares. Também serão obtidos valores, para a temperatura média do corpo-de-prova (K) e fluxo de calor ( $\text{W/m}^2$ ), alcançados por meio de medidor de radiação. Estas informações foram utilizadas, para a determinação da condutividade térmica, bem como das demais propriedades estabelecidas na NBR 15220 (ABNT, 2005a).

Figura 14 - Aparato experimental para análise do conforto térmico.



Fonte: Do autor (2017).

### **3.6 Análise Estatística**

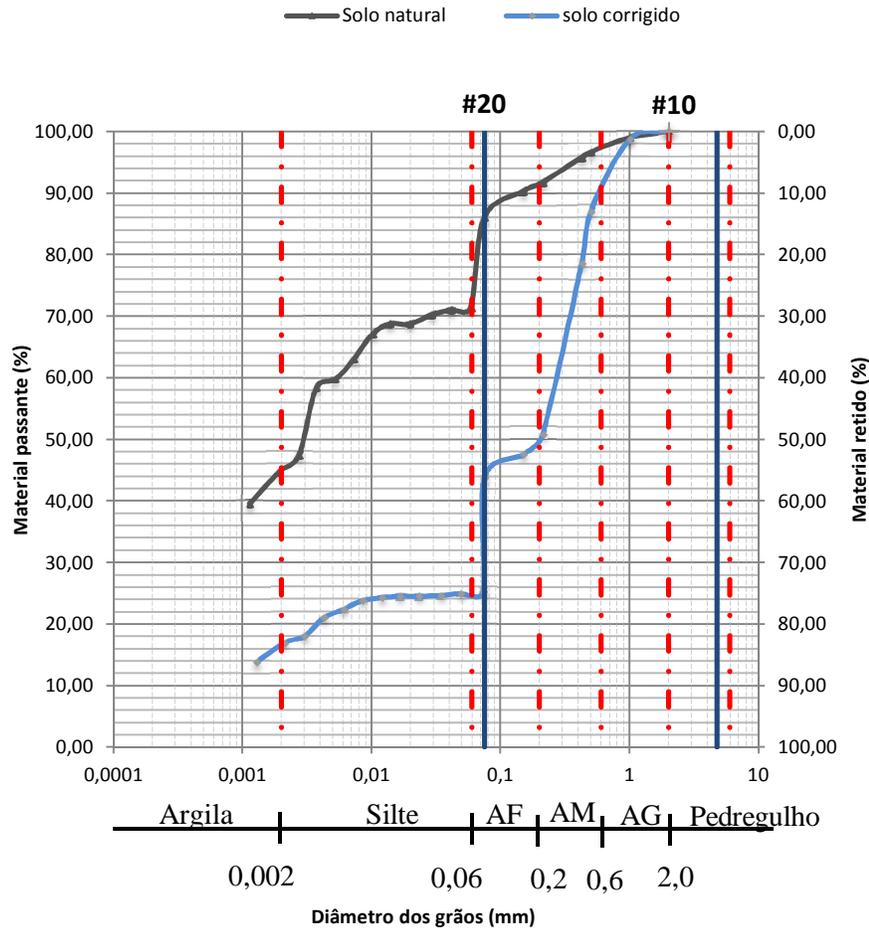
Os dados do experimento foram avaliados, considerando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, foi realizada a análise de regressão linear e, para diferenciação dos tratamentos, foi aplicado o teste de média Scott Knott (SCOTT; KNOTT, 1974) ao nível de 5% de significância.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Análise Granulométrica**

A Figura 15 apresenta a curva granulométrica do solo *in natura* e do solo corrigido com areia, de acordo com os preceitos da NBR 7181 (ABNT, 1984b), bem como a classificação granulométrica, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Figura 15 - Curva granulométrica do solo natural e corrigido.



Fonte: Do autor (2017).

Com base nas curvas granulométricas identificadas, na Figura 15, foi possível determinar o percentual de argila, silte, areia e pedregulho, presentes nos solos natural e corrigido, os resultados encontram-se dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição granulométrica do solo natural e corrigido.

<b>Composição Granulométrica</b>	<b>Solo natural</b>	<b>Solo corrigido</b>
<b>Pedregulho (%)</b>	0	0
<b>Areia (%)</b>	28,58	74,91
<b>Silte (%)</b>	26,68	7,02
<b>Argila (%)</b>	44,74	18,07
<b>% do material que passa pela peneira n°4 (4,8 mm)</b>	100	100
<b>% do material que passa pela peneira n° 200 (0,075mm)</b>	86,09	43,79

Fonte: Do autor (2017).

Observa-se que o percentual de partículas as quais passam na peneira de 200 mesh (abertura de malha igual a 0,075mm) foi igual a 86,09%, para o solo *in natura*, valor este superior ao requisitado pela NBR 10833 (ABNT, 2012c), que estabelece um percentual máximo de grãos passantes na peneira 200 mesh igual a 50%. Dessa forma, para torná-lo adequado à utilização, em misturas de solo-cimento, foi necessário aumentar o percentual de grãos com diâmetros superiores a 0,075mm, diminuindo, assim, a quantidade de finos. Para tanto, foi determinada a correção granulométrica com a adição de areia. O objetivo da correção granulométrica foi o de aumentar a fração correspondente aos grãos com diâmetros superiores a 0,075mm que, no solo *in natura*, foi igual a 13,91%, para entorno de 60%, de forma que o percentual passante na peneira 200 mesh ficasse abaixo de 50%, conforme requisitado pela NBR 10833 (ABNT, 2012c). Logo, para cada quilo de solo corrigido, foram adicionados 534,88 gramas de areia.

Com base na curva granulométrica do solo corrigido, o percentual de grãos passantes na peneira de 200 mesh foi igual a 43,79%, indicando que a correção com areia proposta atingiu o objetivo desejado. O aumento do percentual de areia no solo, em detrimento da redução da quantidade de finos, tende a ser um ponto positivo, de acordo com Segantini (2000). Areia é um

material inerte com função apenas de enchimento, dessa forma, permite que maiores quantidades de cimento sejam destinadas à aglomeração de grãos menores. Contudo os solos necessitam de uma porcentagem mínima de finos, pois a resistência final do solo-cimento deve-se à coesão da fração fina compactada.

De acordo com os estudos desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED, 1999), as porcentagens ideais de areia na mistura devem estar situadas entre 45% a 90%, o teor de silte + argila entre 10 e 55% e teor de argila menor que 20%. Diante desses parâmetros, fica evidente, ao analisar os resultados apresentados na Tabela 12, o êxito obtido na correção granulométrica aplicada.

#### **4.2 Massa específica dos grãos de solo**

A Tabela 13 apresenta os resultados encontrados, para a massa específica dos grãos de solo, para o solo natural e solo corrigido. Observa-se pelos valores, apresentados na Tabela 13, que a massa específica dos grãos de solo, para o solo in natura, foi um pouco maior que a determinada para o solo corrigido. A rigor, esses valores representam a média das massas específicas dos materiais que constituem a fase e estão situados entre 2,60 e 2,90 g/cm<sup>3</sup> (BRAJA, 2007).

A Tabela 14 apresenta o peso específico dos principais constituintes minerais, presentes no solo. Nota-se que os argilominerais (ilita e montmorilonita) apresentam a maior faixa de variação de pesos específicos, podendo chegar a 2,80 g/cm<sup>3</sup>. Dessa forma, o valor encontrado, para a massa específica dos grãos de solo e para o solo corrigido, pode estar associado à substituição de argilominerais mais densos por minerais mais leves, uma vez que o teor de argila foi bastante reduzido, em detrimento da adição de areia.

Tabela 13 - Massa específica dos grãos de solo natural e corrigido.

<b>Tipo de solo</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Solo natural</b>	2,75±0,02
<b>Solo corrigido</b>	2,55±0,01

Fonte: Do autor (2017).

Tabela 14 - Valores de massa específica dos grãos de alguns tipos de minerais.

<b>Mineral</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Quartzo</b>	2,65
<b>Caulinita</b>	2,6
<b>Ilita</b>	2,8
<b>Montmorilonita</b>	2,65-2,80
<b>Haloisita</b>	2,0-2,55
<b>Feldspato Potássico</b>	2,57

Fonte: Adaptado de Braja (2007).

#### 4.3 Limite de Atterberg

Os resultados encontrados, para o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para o solo natural e corrigido, estão dispostos na Tabela 15.

A NBR 10833 (ABNT, 2012c) estabelece que o valor do limite de liquidez, para solos com vista à utilização em misturas de solo-cimento, seja inferior a 45%. De acordo com resultados encontrados, verifica-se que o solo, na sua condição natural, possui limite de liquidez igual a 51%, um pouco acima do permitido por norma. Essa situação pode ser explicada pela presença elevada de partículas finas em sua composição, o que ratifica a necessidade da correção granulométrica aplicada. Conforme a correção adotada, o valor obtido, para o limite de liquidez, foi igual a 27%, situando-se dentro dos limites da norma.

A NBR 10833 (ABNT, 2012c) não estabelece valores limites ao limite de plasticidade, somente para o índice de plasticidade o qual não deve ser superior a 18%. Pelos dados da Tabela 15, observa-se que tanto o índice de plasticidade para o solo natural quanto para o solo corrigido se encontram dentro

da normativa ( $IP < 18\%$ ). O solo, em sua condição natural, apresentava-se como medianamente plástico, segundo a classificação qualitativa de Burmister (1949 apud BRAJA, 2007); após a inserção de areia, houve uma redução considerável, em seu índice de plasticidade, provocado pela queda nos valores observados aos limites de liquidez e plasticidade, passando a ser classificado como ligeiramente plástico.

Tabela 15 - Limites de Atterberg

<b>Tipo de solo</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP(%)</b>
<b>Solo natural</b>	51	40	11
<b>Solo corrigido</b>	27	25	2

Fonte: Do autor (2017).

#### 4.4 Dosagem de cimento

Os resultados encontrados, para o solo corrigido, que são levados em consideração, para a classificação do solo, de acordo com a HRB (1961), estão dispostos na Tabela 16. Segundo as características apresentadas, trata-se de um solo do tipo A-4, conforme pode ser visualizado na Tabela contida no Anexo B. O percentual recomendado de cimento, para esse tipo de solo, é igual a 10% (ABCP, 1986).

Tabela 16 - Valores utilizados para classificação do solo, segundo a H.R.B.

<b>Características do solo</b>	<b>Resultados</b>
<b>Percentual que passa na peneira nº 10</b>	25,10%
<b>Percentual que passa na peneira nº 40</b>	10,66%
<b>Percentual que passa na peneira nº 200</b>	43,79%
<b>Limite de Liquidez</b>	27%
<b>Índice de Plasticidade</b>	2%
<b>Índice de Grupo</b>	2

Fonte: Do autor (2017).

#### 4.5 Ensaio de Compactação

Com o objetivo de verificar a variação da umidade ótima e da massa específica aparente seca, em virtude da substituição parcial do cimento por partículas de casca de café, foram realizados ensaios de compactação para os cinco tratamentos avaliados. A Tabela 17 apresenta os valores encontrados, para a umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, consequentes das composições estudadas.

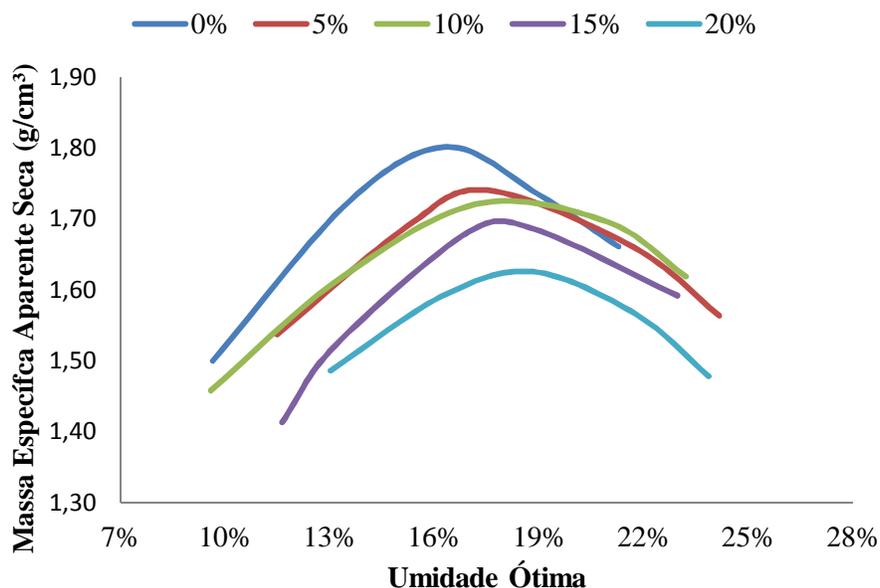
A Figura 16 demonstra as curvas de compactação obtidas, a partir das quais foram retirados os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Ressalta-se que os ensaios foram realizados com o solo previamente corrigido com areia.

Tabela 17 - Valores obtidos para a massa específica aparente seca máxima e umidade ótima para as composições adotadas.

Casca de café/cimento	Composição			W <sub>ot</sub> (%)	d <sub>máx</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
	Solo Corrigido (%)	Cimento (%)	Casca de café (%)		
<b>0%</b>	90%	10%	0%	16,60%	1,80
<b>5%</b>	90%	9,5%	0,5%	18,00%	1,73
<b>10%</b>	90%	9,0%	1%	18,20%	1,72
<b>15%</b>	90%	8,5%	1,5%	18,70%	1,69
<b>20%</b>	90%	8,0%	2,0%	18,40%	1,62

Fonte: Do autor (2017).

Figura 16 - Curva de Compactação para todas as porcentagens de casca de café avaliadas.



Fonte: Do autor (2017).

A partir dos resultados encontrados, pode-se inferir que a inserção das partículas de casca de café na mistura de solo-cimento tende a reduzir a massa específica aparente seca, ao passo que aumenta a umidade ótima. Ao comparar os tratamentos 0 e 4, observa-se que houve uma redução de 10% na massa específica aparente seca máxima e um acréscimo igual a 9,78% na umidade ótima da mistura.

De maneira análoga, Milani (2005), em seu estudo sobre tijolos confeccionados com solos arenosos e argilosos combinados com cimento, cal e casca de arroz, constatou que quanto maior a quantidade de casca inserida na mistura maior era a umidade ótima apresentada e, conseqüentemente, menor a massa específica aparente seca máxima. Um dos pontos que contribui, para esse

desfecho, é a dificuldade encontrada na compactação da mistura, para teores de casca elevados, que faz com que o volume de vazios aumente no sistema compactado.

Rodrigues (2014), em seu estudo sobre tijolos de solo-cimento confeccionados com resíduos de Estação de Tratamento de Água (ETA), cujo solo adotado, também, sofreu correção granulométrica com areia, encontrou valores para a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo iguais a 1,708 g/cm<sup>3</sup> e 18%, para a mistura de solo e cimento, o que demonstra proximidade com os valores obtidos neste estudo.

#### 4.6 Caracterização das partículas de casca de café

A Tabela 18 apresenta os resultados da análise química e densidade básica das partículas de casca de café antes e posterior ao tratamento aplicado

Tabela 18 - Resultado da análise química e densidade básica das partículas.

Casca de café	Cinzas (%)	Lignina (%)	Extrativos (%)	Holocelulose (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Sem tratamento</b>	5,89±0,28A	50,70±0,39A	11,47±0,82A	31,93±0,53A	0,139±0,02A
<b>Com tratamento</b>	2,47±0,04B	24,30±2,08B	7,38±0,49B	65,85±1,63B	0,298±0,08B

Fonte: Do autor (2017).

Nota: Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância.

Os resultados demonstram que houve variação significativa, para os diferentes componentes químicos avaliados, em virtude da aplicação do tratamento nas partículas de casca de café. Os teores de cinzas, lignina e extrativos sofreram considerável redução de seus valores, tendo em vista o emprego combinado com cimento. A principal vantagem obtida com o uso da lavagem do material em solução de cal foi a redução no teor de extrativos totais, presente no material *in natura*, uma vez que os amidos, açúcares, fenóis dentre

outros componentes presentes no teor de extrativo são os principais responsáveis pela inibição da reação de hidratação do cimento, o que influencia, diretamente, as propriedades físicas e mecânicas do material (FRYBORT et al., 2008; IWAKIRI; PRATA, 2008; WEATHERWAX; TARKOW, 1964).

O aumento, no teor de holocelulose observado, pode ser atribuído à redução dos demais componentes e, também, foi constatado por Asasutjarit et al. (2007), ao estudarem a composição química de fibras de coco verde com diferentes tratamentos; porém o aumento verificado ocorre apenas, em termos percentuais e não absolutos, uma vez que não há produção de holocelulose, a partir da redução dos outros componentes, por meio da aplicação de tratamento.

A Tabela 19 apresenta os valores encontrados na literatura para a composição química da casca de café *in natura*. É perceptível a discrepância nos resultados obtidos pelos variados autores, o que pode ser explicado pela diferença nas características da biomassa utilizada, tais como espécie, idade de planta, estágio de maturação, fatores climáticos entre outros.

Tabela 19 - Composição química da casca de café *in natura*, de acordo com outros autores.

<b>Autores</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Extrativos (%)</b>	<b>Holocelulose (%)</b>
<b>Navya e Murthy (2012)</b>		28,3		47
<b>Gouvea (2009)</b>	5,4	9,0		27
<b>Oliveira (2015)</b>	0,20	33,52	6,67	52,02
<b>Freitas (2016)</b>	0,36	13,68	38,05	44,39

Fonte: Do autor (2017).

Vale et al. (2007) obtiveram densidades iguais a 0,166 g/cm<sup>3</sup> e 0,144 g/cm<sup>3</sup>, para a casca de café seca e úmida da variedade (*Coffea arabica* L.), valores próximos aos determinados neste estudo. Observa-se, ainda, que a densidade da casca, depois de realizado o tratamento, trituração e peneiramento, foi bem maior que a da casca *in natura*. Essa situação ocorreu pelo aumento da

superfície específica e conseqüente redução do número de vazios, que deixou o material menos poroso (MILANI, 2005).

Como foi realizado o tratamento em solução de cal, outra hipótese é a possível existência de resíduos de cal, que, segundo Zucco (1999), podem mascarar os resultados, aumentando o valor da densidade, uma vez que a cal é bem mais densa que a partícula.

#### **4.7 Análise Dimensional**

A Tabela 20 apresenta as medidas encontradas para os tijolos, de acordo com os tratamentos e idades avaliadas. Verifica-se que alguns valores encontrados não obedeceram ao limite de variação proposto em norma e essa situação aconteceu, principalmente, com a medida de altura, que apresentou valores variando de 5,21 a 5,66 cm.

Tabela 20 - Dimensões médias e desvio padrão dos tijolos produzidos de acordo com o tratamento e idade avaliados.

Casca de café/ cimento	Idade (dias)	Dimensões		
		C (cm)	L (cm)	A (cm)
0%	14	20,28±0,09	10,23±0,03	5,63±0,04
5%	14	20,25±0,03	10,27±0,05	5,53±0,05
10%	14	20,27±0,03	10,27±0,03	5,66±0,07
15%	14	20,27±0,04	10,29±0,05	5,56±0,04
20%	14	20,33±0,04	10,30±0,03	5,47±0,03
0%	28	20,22±0,04	10,24±0,03	5,47±0,11
5%	28	20,24±0,03	10,26±0,03	5,24±0,15
10%	28	20,24±0,05	10,26±0,03	5,33±0,13
15%	28	20,35±0,06	10,33±0,03	5,53±0,10
20%	28	20,47±0,10	10,39±0,07	5,40±0,14
0%	56	20,16±0,11	10,19±0,06	5,21±0,06
5%	56	20,25±0,05	10,24±0,03	5,21±0,09
10%	56	20,23±0,08	10,25±0,03	5,45±0,13
15%	56	20,29±0,09	10,27±0,03	5,64±0,22
20%	56	20,33±0,10	10,30±0,05	5,34±0,09

Fonte: Do autor (2017).

O processo de prensagem se deu, por meio de uma prensa manual, cuja aplicação da carga ocorre de maneira centrada, uma vez que foram prensados três tijolos por etapa e foi utilizado um aparato de madeira para dividir a carga entre os elementos. Uma das hipóteses, para as oscilações de altura encontradas, é a distribuição desuniforme da carga de prensagem, ou seja, alguns pontos foram mais comprimidos que outros, resultando nas alterações de espessura encontradas.

Outros autores, também, relataram dificuldades em padronizar a altura de tijolos de solo-cimento produzidos em prensas manuais. Porras, Isaac e Morita (2008) e Rodrigues (2014), produzindo tijolos do tipo II de solo-cimento com lodo de ETA e solo-cimento, lodo de ETA e resíduos de construção civil, obtiveram espessuras para os tijolos variando de 7,37 a 7,80 cm e 5,4 a 6,0 cm, respectivamente, valores bem acima do determinado em norma de 5 cm.

#### 4.8 Massa específica aparente seca e Grau de Compactação

Com base nos valores obtidos, para o volume e massa seca, foi possível a determinação da massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos de cada tratamento. Os valores médios da massa específica aparente seca foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância encontram-se discriminadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos e idades de avaliação, na variável massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>).

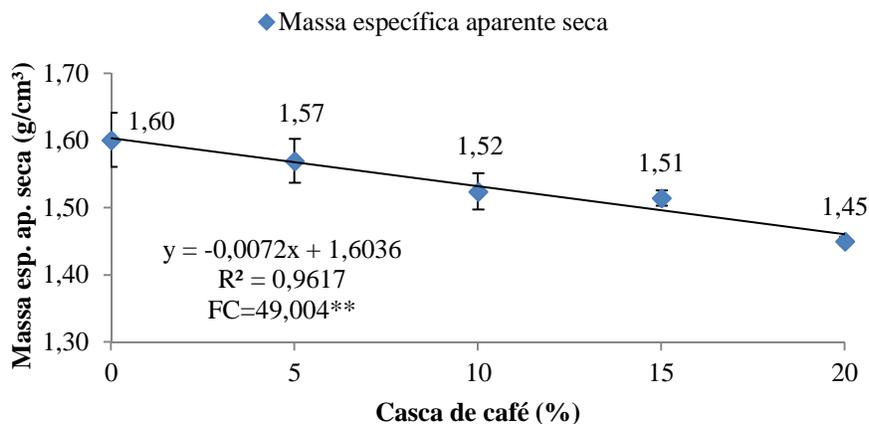
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
<b>Idade</b>	2	0,015413	0,007707	12,611	0,0001
<b>Tratamento</b>	4	0,119787	0,029947	49,004	0,0000
<b>Tratamento*Idade</b>	8	0,006187	0,000773	1,265	0,2979
<b>Erro</b>	30	0,018333	0,000611		
<b>Total corrigido</b>	44	0,159720			
<b>CV (%) =</b>	1,61				
<b>Média geral:</b>	1,532 g/cm <sup>3</sup>		Número de observações:	45	

Fonte: Do autor (2017).

Pelos dados da Tabela 21, verifica-se que os fatores idade de avaliação e tipo de tratamento foram significativos, para a variável massa específica aparente seca, porém a interação entre eles não foi significativa.

A Figura 17 apresenta os valores médios obtidos para a massa específica aparente seca dos tijolos, em função do percentual de substituição de cimento por casca de café, empregado em cada tratamento.

Figura 17 - Análise de regressão, valores médios e respectivos desvio padrão, para a massa específica aparente seca, nos diferentes níveis de substituição de cimento por casca de café.



Fonte: Do autor (2017).

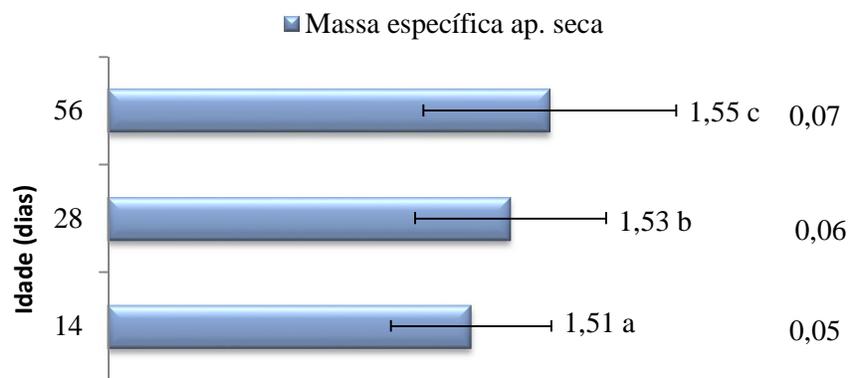
\*\*Análise de regressão significativa ao nível de 5%.

Observa-se pelos dados contidos, na Figura 17, que existe uma relação inversamente proporcional entre o teor de casca de café utilizado e o valor da massa específica aparente seca, quando comparados os valores da massa específica aparente seca, para o tratamento controle e o tratamento contendo 20% de casca de café, observa-se uma redução de 9,06%. Zak et al. (2016), em seus estudos com misturas de solo, cimento, gesso e fibras de linho e cânhamo, também, observaram o decréscimo da massa específica, a partir da introdução de matéria vegetal. Os autores atribuem esse efeito à baixa densidade das fibras vegetais e à necessidade de maiores teores água para atingir a consistência ideal de moldagem.

Quando avaliado apenas o fator idade dos corpos de prova, observa-se pela Figura 18, que as médias alcançadas, para as idades de 14, 28 e 56 dias, foram estatisticamente diferentes entre si. Assinala-se que o valor da massa específica seca foi maior, conforme o avanço na idade de avaliação e esse

comportamento pode estar associado ao processo de hidratação do cimento, uma vez que os espaços vazios ocupados, inicialmente pela água, são preenchidos gradativamente pelos produtos de hidratação, resultando na densificação do material com o passar do tempo (TAYLOR, 1998).

Figura 18 - Valores médios e desvio padrão da massa específica aparente seca, em função da idade de avaliação dos tijolos.



Fonte: Do autor (2017).

Nota: Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância. = desvio padrão.

Com os resultados obtidos, para a massa específica aparente seca, foi possível calcular o grau de compactação dos diferentes tratamentos. O grau de compactação pode ser definido pela relação entre a massa específica aparente seca, encontrada para o tijolo e a massa específica seca aparente máxima, encontrada no ensaio de compactação Proctor Normal. A Tabela 22 apresenta os valores encontrados neste estudo.

Tabela 22 - Grau de compactação dos tijolos de solo-cimento.

	<b>Tratamento</b>	<b>seca,ap, tijolo (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>seca,ap,máx, lab (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>GC (%)</b>
<b>14 dias</b>	0	1,57±0,03	1,80	86,95
	1	1,54±0,01	1,73	89,12
	2	1,49±0,01	1,72	86,68
	3	1,50±0,01	1,69	89,02
	4	1,44±0,01	1,62	89,17
<b>28 dias</b>	0	1,60±0,02	1,80	88,63
	1	1,56±0,02	1,73	90,27
	2	1,54±0,02	1,72	89,63
	3	1,51±0,03	1,69	89,51
	4	1,45±0,07	1,62	89,49
<b>56 dias</b>	0	1,64±0,03	1,80	91,38
	1	1,61±0,01	1,73	92,98
	2	1,54±0,01	1,72	89,34
	3	1,53±0,01	1,69	90,40
	4	1,46±0,02	1,62	89,87

Fonte: Do autor (2017).

Nota:  $seca,ap, tijolo$  - massa específica aparente seca do tijolo.

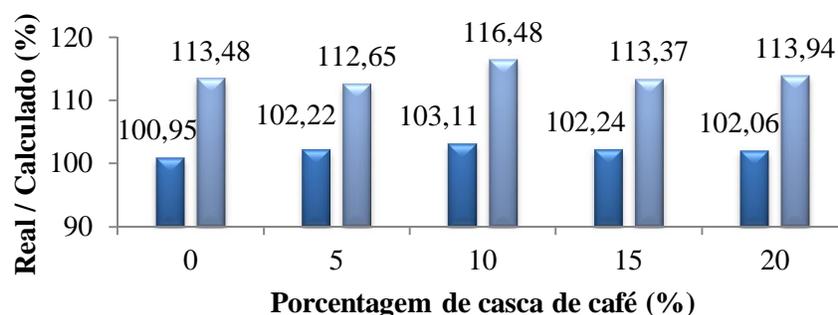
$seca,ap,máx, lab$  - massa específica aparente seca máxima, encontrada em laboratório, por meio do ensaio Proctor Normal.

De acordo com Bueno e Vilar (1999), o Grau de Compactação ideal situa-se entre 95% a 105%. Todos os tratamentos confeccionados neste trabalho obtiveram valores menores que 95%, ficando abaixo do recomendado.

A Figura 19 apresenta a relação entre a massa seca, inicialmente calculada e a massa seca, encontrada após o processo de fabricação, bem como o volume calculado e volume obtido, após a manufatura dos tijolos, em cada tratamento avaliado. No cálculo do volume inicial, foram consideradas as dimensões do tijolo do tipo I, segundo a NBR 8492 (ABNT, 2012b) e a massa seca inicial foi calculada, a partir da multiplicação da massa específica aparente seca, obtida no ensaio de compactação, para cada tratamento pelo volume inicial.

Figura 19 - Relação entre a massa seca e volume real e a massa seca e volume calculados.

■ massa seca real / massa seca calculada ■ volume real / volume calculado



Fonte: Do autor (2017).

Considerando o valor de 100% como ideal, em que o valor encontrado corresponde exatamente ao valor calculado, os resultados apresentados na Figura 19 demonstram que tanto a massa seca real quanto o volume real foram superiores aos inicialmente calculados, porém essa diferença foi mais acentuada para a relação volume real / volume calculado.

O volume maior que o esperado implica um valor de massa específica aparente seca menor, o que, conseqüentemente, leva a grau de compactação mais baixo. Dessa forma, pode-se concluir que o baixo grau de compactação decorre, principalmente, da dificuldade em fabricar os tijolos com as dimensões previstas.

#### 4.9 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado, em três tijolos diferentes de cada tratamento, nas idades de 14, 28 e 56 dias. Os valores médios da absorção foram analisados, estatisticamente e suas respectivas análises de variância encontram-se discriminadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos e idades de avaliação, na variável absorção de água (%).

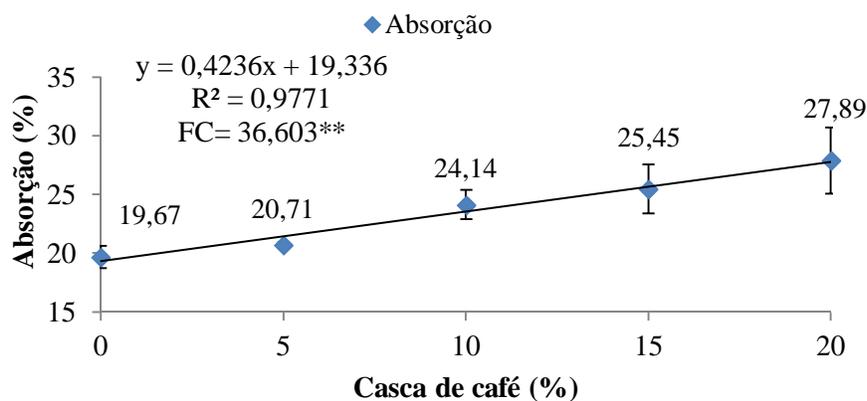
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
<b>Idade</b>	2	413,233711	103,308428	36,603	0,0024
<b>Tratamento</b>	4	41,923498	20,961749	7,427	0,0000
<b>Tratamento*Idade</b>	8	46,513236	5,814154	2,060	0,0727
<b>Erro</b>	30	84,672933	2,822431		
<b>Total corrigido</b>	44	586,343378			
<b>CV (%) =</b>	7,13				
<b>Média geral:</b>	23,5722222		Número de observações:	45	

Fonte: Do autor (2017).

Observa-se, pelos resultados encontrados na Tabela 23, que os fatores idade de avaliação e tipo de tratamento foram significativos, para a variável absorção de água, porém a interação entre eles não foi relevante.

A Figura 20 apresenta os valores médios obtidos, para a absorção de água dos tijolos, em função do percentual de substituição de cimento por casca de café, empregado em cada tratamento.

Figura 20 - Análise de regressão, valores médios e respectivos desvio padrão, para a absorção de água, nos diferentes níveis de substituição de cimento por casca de café.



Fonte: Do autor (2017).

\*\*Análise de regressão significativa ao nível de 5%.

Verifica-se, pelo gráfico apresentado na Figura 20, que quanto maior o teor de casca de café empregado maior foi a capacidade de absorver água apresentada pelo material, ao comparar os resultados obtidos para o tratamento controle (0% de casca de café) e o tratamento com 20% de casca de casca. Destaca-se um acréscimo no percentual de absorção igual a 41,79%.

Estes resultados podem ser explicados pela falta de interação entre o sistema solo-cimento e casca e pela presença de componentes químicos, tais como lignina, extrativos, celulose, hemicelulose entre outros, presentes na casca de café, que tendem a retardar ou até mesmo impedir o processo de hidratação do cimento, o que promove um acréscimo no volume de vazios, deixando o material mais poroso e com uma maior capacidade de absorver água, conforme o aumento no teor de partículas.

Os açúcares provenientes da hidrólise da lignina e da solubilização da hemicelulose são os principais responsáveis pela queda na temperatura e

consequente atraso, no processo de hidratação do cimento, segundo alguns autores como Bilba, Arsene e Ouensanga (2007), Sudin e Swamy (2006) e Vaickelionis e Vaickelioniene (2006).

Ferreira, Gobo e Cunha (2008), avaliando a interferência da substituição parcial do cimento por casca de arroz e braquiária, em misturas de solo-cimento, encontraram valores para a absorção de água iguais a 12,97% e 13,78%, para a casca de arroz e 12,33% e 12,71%, para a casca de braquiária, considerando a substituição pelas cascas de 10 e 20%, respectivamente, do teor inicial de cimento.

Souza (2011) encontrou valores para a absorção de água igual a 19,47% e 21,53%, considerando a substituição parcial do cimento por casca de arroz em percentuais de 20% e 40% da quantidade inicial de cimento na mistura de solo-cimento.

Lins (2006) utilizou a cinza da casca de café, em substituição parcial do cimento, na fabricação de tijolos de solo-cimento. Os valores encontrados, para percentuais de substituição de 0%, 25%, 50% e 75% foram, aproximadamente iguais, a 18,05%, 16,32%, 16,59% e 16,89%, respectivamente.

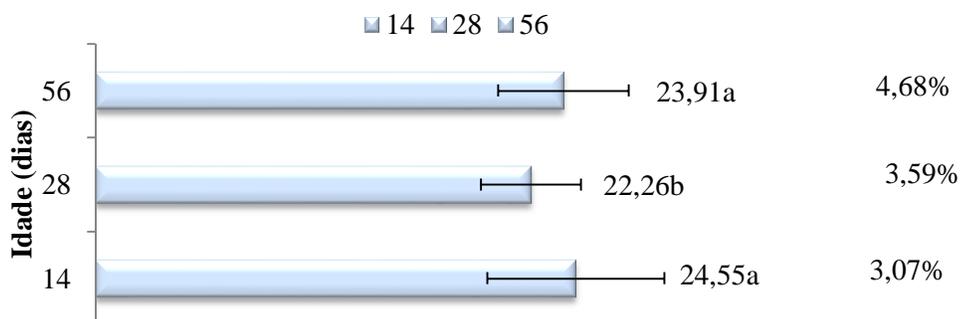
Os valores determinados neste trabalho foram ligeiramente maiores, quando comparados com outros trabalhos que utilizaram matéria vegetal em misturas de solo-cimento. A NBR 8492 (ABNT, 2012b) estabelece o valor médio limite para a absorção de água igual a 20%. Dessa forma, independente da idade, somente o tratamento com 0% de casca de café se enquadra no requisito normativo.

A Figura 21 apresenta o resultado da análise estatística, para o fator idade dos corpos-de prova, quanto à absorção de água. Salienta-se que as médias do resultado de absorção, aos 14 e 56 dias foram estatisticamente iguais e se diferenciaram do resultado encontrado aos 28 dias. Percebe-se que de 14 para 28 dias houve um decréscimo, no percentual de água absorvida pelos tijolos, porém,

aos 56 dias, esse percentual voltou a subir. Normalmente é esperado que a absorção de água diminua com o passar da idade, pois, como dito anteriormente, com o avanço da idade, os produtos formados pela hidratação do cimento vão preenchendo os espaços vazios existentes, diminuindo, assim, a porosidade do material e, conseqüentemente, sua capacidade de absorção.

Ao analisar os dados obtidos para a massa específica aparente seca (FIGURA 18), em função da idade e constatando que existe uma correlação inversamente proporcional entre esta propriedade e a absorção de água, detecta-se que o maior valor obtido foi verificado aos 56 dias. Desta forma, a hipótese mais provável, para o aumento da absorção aos 56 dias, seria alguma falha no processo produtivo ou na execução do ensaio.

Figura 21 - Valores médios e desvio padrão, para a absorção de água, em função da idade de avaliação dos tijolos.



Fonte: Do autor (2017).

Nota: Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância. = desvio padrão.

#### 4.10 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada, a partir de ensaios, realizados em quatro tijolos diferentes de cada tratamento, nas idades de 14, 28 e 56 dias. Os valores médios obtidos foram analisados, estatisticamente e suas respectivas análises de variância encontram-se discriminadas na Tabela 24.

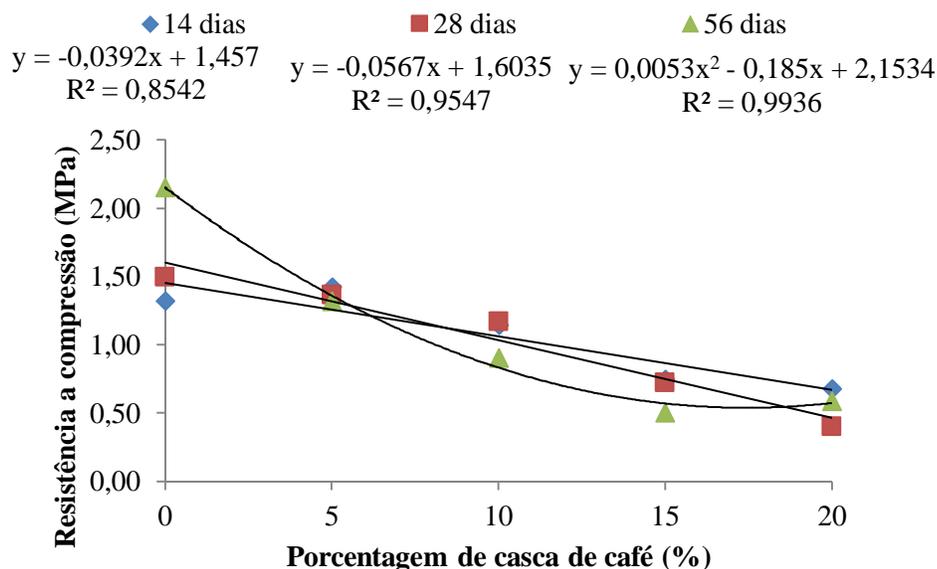
Tabela 24 - Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos e idades de avaliação, na variável resistência à compressão (MPa).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
<b>Idade</b>	2	0,039773	0,019887	1,436	0,2485
<b>Tratamento</b>	4	10,399227	2,599807	187,779	0,0000
<b>Tratamento*Idade</b>	8	2,011993	0,251499	18,165	0,0000
<b>Erro</b>	45	0,623025	0,013845		
<b>Total corrigido</b>	59	13,074018			
<b>CV (%) =</b>	11,03				
<b>Média geral:</b>	1,0671667		Número de observações:	60	

Fonte: Do autor (2017).

Pela Tabela 24 pode-se afirmar que o fator tipo de tratamento, ou seja, o percentual de casca, utilizado em substituição parcial ao cimento, foi significativo, bem como sua interação com o fator idade de avaliação. A Figura 22 apresenta o resultado da análise de regressão linear, efetuada para cada idade de avaliação, em função das porcentagens de casca de café. Os valores médios encontrados com seus respectivos desvio padrão são informados na Tabela 25.

Figura 22 - Análise de regressão para a resistência à compressão, nos diferentes níveis de substituição de cimento por casca de café, aos 14, 28 e 56 dias de idade.



Fonte: Do autor (2017).

Tabela 25 - Valores médios com seus respectivos desvios padrão, para a resistência à compressão, em MPa.

Idade (dias)	Porcentagens de casca de café				
	0%	5%	10%	15%	20%
14	1,32±0,13	1,42±0,09	1,15±0,04	0,75±0,07	0,68±0,01
28	1,50±0,11	1,37±0,15	1,18±0,06	0,73±0,07	0,41±0,03
56	2,16±0,27	1,32±0,16	0,91±0,09	0,51±0,09	0,60±0,03

Fonte: Do autor (2017).

Com relação ao percentual de casca de café empregado, identifica-se pela Figura 22, que o acréscimo no teor de casca aplicado foi significativo, em todas as idades, implicando a redução da resistência à compressão.

Ao comparar os tratamentos T0 e T4, observa-se um decréscimo na resistência de, aproximadamente, 52% aos 14 dias, 73% aos 28 dias e 72% aos

56 dias. A queda na resistência dos tijolos já era um fator esperado, uma vez que, ao longo dos tratamentos, a quantidade empregada de cimento na mistura foi reduzida, porém outros trabalhos, considerando o mesmo princípio e utilizando resíduos vegetais, obtiveram, de certa forma, bons resultados para um percentual máximo de substituição do cimento de até 30%, como pode ser visualizado na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados encontrados na literatura para a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento com substituição parcial do cimento por resíduo vegetal.

<b>Autores</b>	<b>Tipo de resíduo vegetal</b>	<b>Teor de cimento (%)</b>	<b>Teor de resíduo/cimento (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Idade (dias)</b>
<b>Souza (2011)</b>	Casca de arroz	10%	10%	2,16	28
<b>Ferrari et al. (2014)</b>	Cinza da casca de arroz	8%	10%	2,22	21
<b>Milani e Freire (2006)</b>	Casca de arroz	12%	20% 30%	2,81 2,18	28 28
<b>Ferreira, Gobo e Cunha (2008)</b>	Casca de arroz Casca de braquiária	10% 10%	10% 10%	2,25 2,16	28 28

Fonte: Do autor (2017).

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho, percebe-se que eles ficaram abaixo dos demais estudos, somente o tratamento T0 (0% de casca de café), avaliado aos 56 dias de idade, conseguiu alcançar a resistência mínima de 2,0 Mpa, solicitada pela norma NBR 8491 (ABNT, 2012a), o que sinaliza que outros fatores interferiram no ganho de resistência do material.

Algumas hipóteses podem ser levantadas, como a compactação não eficaz da mistura, a incompatibilidade da matéria vegetal com o cimento, o tipo de tratamento realizado na partícula vegetal e o tipo de cimento empregado.

O grau de compactação obtido foi inferior a 95%, indicando que a massa específica aparente seca alcançada, após o processo de produção, foi significativamente menor que a obtida no ensaio de compactação. Quanto menor o valor da massa específica aparente seca maior é presença de vazios no material, o que interfere, negativamente, no sistema solo-aglomerante, levando a menores valores de resistência.

Como relatado anteriormente, os compostos químicos, presentes no resíduo vegetal, tais como extrativos, ligninas, hemiceluloses entre outros, interferem, significativamente, na reação de hidratação do cimento. Sedan et al. (2008), ao avaliarem a compatibilidade química entre fibras de cânhamo e cimento, constataram que a incorporação das fibras provocou um atraso de 45 minutos, no tempo na pega inicial do cimento. Os autores, também, observaram a presença de íons  $\text{OH}^-$  gerados, a partir da solubilização da pectina presente nas fibras. Esses íons reagiram com cálcio presente no cimento, formando cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dessa forma, as reações cálcio silício foram prejudicadas, dificultando a formação de silicato de cálcio (C-S-H), principal produto de hidratação do cimento e responsável pela resistência do compósito.

Com relação ao tipo de tratamento, Fan et al. (2012), ao analisarem vários tipos de tratamento aplicado a partículas de madeira, verificaram que a remoção de extrativos, por meio de lavagem em água quente e soluções de cloreto de cálcio, hidróxido de cálcio e metanol, teve efeito significativo, aumentando a compatibilidade entre a madeira e o cimento, obtendo o melhor resultado para lavagem e solução de hidróxido de cálcio.

Entretanto, no estudo realizado por Silva, José e Beraldo (2004), em compósitos de cimento, bambu, casca de café e arroz, a lavagem das partículas

de casca de café, em solução de cal hidratada, não foi eficiente para aumentar a resistência à compressão do compósito, os melhores resultados foram obtidos para tratamento de mineralização das partículas.

Ainda, de acordo com Silva, José e Beraldo (2004), o tipo de cimento empregado, CP II E 32 ou CP V ARI, foi mais determinante no quesito resistência à compressão do que o tratamento aplicado às partículas, uma vez que a reação de hidratação do cimento CP II E 32 foi mais prejudicada pela presença de compostos inibidores de pega que a do CP V ARI. A resistência à compressão simples da argamassa de cimento e casca de café foi cerca de cinco vezes maior para os tratamentos contendo CP V ARI que obtida para o CP II E 32.

Portanto torna-se evidente que somente a lavagem das partículas, apesar de ter reduzido a quantidade extrativos e lignina presentes no resíduo, foi insuficiente para garantir que a reação de hidratação do cimento fosse satisfatória, o que pode ter contribuído para os baixos valores de resistência à compressão alcançada neste trabalho.

A Tabela 27 apresenta o resultado do teste de média aplicado para avaliar a interação entre o tipo de tratamento e a idade de ensaio dos tijolos.

Tabela 27 - Valores médios com seus respectivos desvios padrão e teste de média, para a resistência à compressão, em MPa.

Idade (dias)	Porcentagens de casca de café				
	0%	5%	10%	15%	20%
14	1,32±0,13a	1,42±0,09a	1,15±0,04a	0,75±0,07a	0,68±0,01a
28	1,50±0,11b	1,37±0,15a	1,18±0,06a	0,73±0,07a	0,41±0,03b
56	2,16±0,27c	1,32±0,16a	0,91±0,09b	0,51±0,09b	0,60±0,03a

Fonte: Do autor (2017).

Nota: Valores médios seguidos por letra minúscula, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, com relação à idade de avaliação.

Verifica-se que, para o tratamento controle, a resistência à compressão foi maior, conforme o avanço na idade dos corpos de prova. Observa-se um

ganho de resistência de 13,54% de 14 para 28 dias e de 44% de 28 para 56 dias. Este ganho de resistência está relacionado ao preenchimento dos poros pelos componentes formados, principalmente, pela hidratação dos silicatos bicálcico ( $C_2S$ ) e ( $C_3S$ ), que são responsáveis pelo crescimento da resistência ao longo do tempo.

Para um percentual de 5% de casca de café, todas as idades obtiveram médias, estatisticamente iguais, indicando, mais uma vez, que o resíduo vegetal afetou o processo de hidratação do cimento, impedindo o ganho de resistência com o passar da idade.

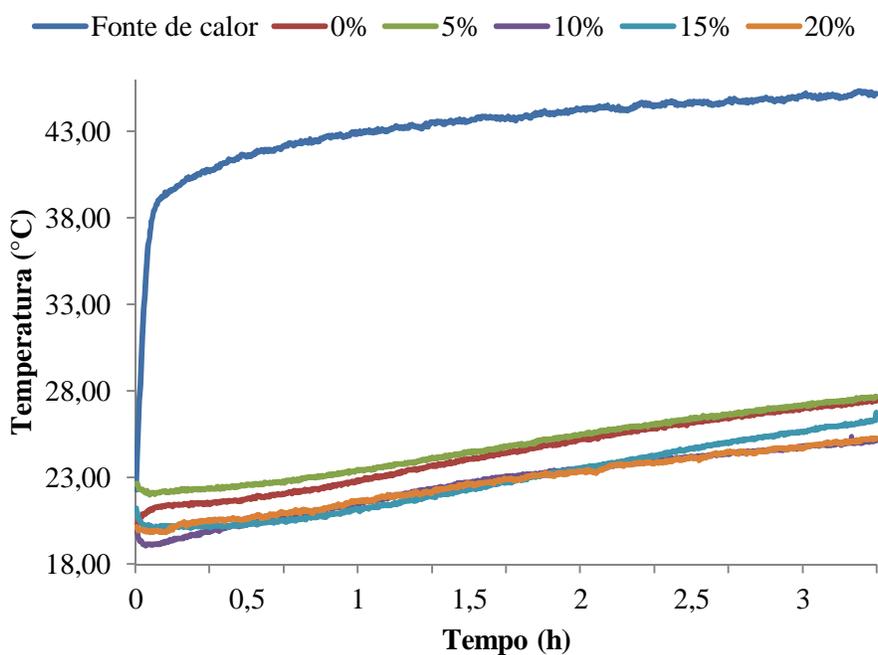
O comportamento, verificado para os percentuais de substituição de cimento por casca igual a 10% e 15%, foi semelhante. Para ambos não foram encontradas diferenças significativas, nas idades de 14 e 28 dias, já os tijolos avaliados aos 56 dias apresentaram médias significativamente inferiores. Para o teor de incorporação igual a 20%, o menor valor de resistência encontrado foi aos 28 dias que apresentou média estatisticamente diferente das idades de 14 e 56 dias, que foram iguais entre si. A baixa resistência encontrada aos 28 dias, para o percentual de substituição igual a 20%, provavelmente está associada a alguma falha no processo produtivo, uma vez que essa tendência não foi observada para as demais idades. Já redução da resistência aos 56 dias, para os percentuais de 10% e 15%, pode estar relacionada ao ataque alcalino sofrido pelas partículas vegetais, em razão do elevado pH da água presente nos poros da pasta de cimento (SAVASTANO, 2000).

Embora a média dos valores de resistência à compressão dos tijolos fabricados com resíduo vegetal ter sido inferior aos 2 Mpa, requisitado pela NBR 8491 (ABNT, 2012a), esses tijolos poderiam ser utilizados em substituição ao adobe, por exemplo, o qual requer uma resistência à compressão menor igual a 0,7 MPa, de acordo com Norma Técnica de Edificación- NTE E.080 (INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA, 2000).

#### 4.11 Conforto Térmico e Propriedades Térmicas

A Figura 23 apresenta as temperaturas captadas nos sensores, ao longo do tempo de ensaio, para os tijolos contendo 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de casca de café em substituição parcial do cimento.

Figura 23 - Isolamento térmico dos tijolos de acordo com adição de casca de café.



Fonte: Do autor (2017).

A partir da análise do gráfico de Temperatura x Tempo (FIGURA 23), podem-se chegar a algumas constatações: as curvas obtidas, para os percentuais 0% e 5% de substituição de cimento por casca de café foram praticamente idênticas, o que indica que a inserção da partícula em percentual de 5%, praticamente, não interfere na condução de calor do material, entretanto, para os

percentuais de 10%, 15% e 20%, houve uma redução nas temperaturas observadas ao longo do tempo.

A condutividade térmica foi calculada, considerando a radiação emitida pela fonte de calor, obtida com o auxílio de um aparelho medidor de radiação, medidas de espessura dos corpos de prova, bem como variação de temperatura, calculada a partir das trinta últimas medições registradas pelos termopares, na base e no topo dos tijolos. Os resultados são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Gradientes de temperatura de cada tratamento.

<b>% casca de café</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Esp. (m)</b>	<b>Radiação (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m.K)</b>
<b>0</b>	17,25±1,20a	0,1027	570	0,20
<b>5</b>	16,64±0,45a	0,1026	570	0,20
<b>10</b>	20,94±0,35b	0,1028	570	0,20
<b>15</b>	20,80±0,56b	0,1027	570	0,20
<b>20</b>	20,60±0,67b	0,1035	570	0,20

Fonte: Do autor (2017).

Observa-se que as variações de temperatura, para os percentuais de 0% e 5%, apresentaram médias iguais estatisticamente, assim como as porcentagens de 10%, 15% e 20%, diferenciando-se entre si.

Esse resultado confirma a tendência de comportamento das curvas apresentadas na Figura 23.

Apesar da variação de temperatura ter aumentado significativamente, de acordo com a inserção de partículas de casca de café nos tijolos, percebe-se que não foi suficiente, para provocar uma redução no resultado da condutividade térmica, uma vez que, para todos os tratamentos avaliados, o valor obtido foi igual a 0,20 W/ m°C.

Os demais dados das propriedades termofísicas dos tijolos de solo-cimento são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Principais propriedades termofísicas dos tijolos.

<b>Trat.</b>		<b>Rt</b>	<b>Ut</b>	<b>FSe</b>	
<b>0</b>	1816,67	0,20	0,51	1,95	5,06
<b>1</b>	1640,00	0,20	0,51	1,95	5,07
<b>2</b>	1580,00	0,20	0,51	1,95	5,06
<b>3</b>	1513,33	0,20	0,51	1,95	5,06
<b>4</b>	1480,00	0,20	0,52	1,93	5,02

Fonte: Do autor (2017).

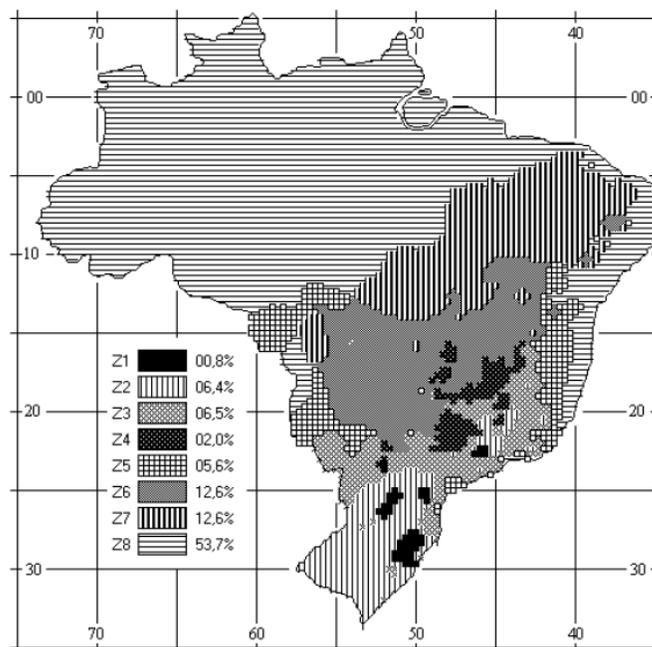
Nota: - massa específica aparente ( $\text{kg/m}^3$ ); - condutividade térmica ( $\text{W/m.K}$ ); Rt- resistência térmica ( $\text{m.K/W}$ ); Ut- transmitância térmica ( $\text{W/m.K}$ ); FSe- fator de ganho solar (%).

A NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) estabelece valores, para a condutividade térmica de tijolos cerâmicos, variando de 0,70 a 1,05  $\text{W/m.K}$  para tijolos com massa específica de 1000 a 2000  $\text{kg/m}^3$ , respectivamente. Os tijolos desenvolvidos neste estudo possuíam valores de massa específica, variando de 1480 a 1816,67  $\text{kg/m}^3$ , enquadrando-se dentro da norma, porém as condutividades térmicas e calores específicos alcançados foram inferiores aos valores normativos. Do ponto de vista de conforto térmico, essa redução é ainda mais favorável, tendo em vista que edificações construídas com materiais com valores de condutividade térmica menores implicam temperaturas mais amenas dentro dos ambientes.

Pelos valores obtidos, para transmitância térmica e fator de ganho solar, verifica-se que eles se enquadram, nas determinações da NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), para vedações externas do tipo parede leve, que requerem que a transmitância térmica seja menor que 3  $\text{W/m}^2.\text{K}$  e fator de ganho solar menor igual a 5,0%. Esse tipo de vedação é recomendada, para as zonas bioclimáticas 1 e 2. Pelo mapa da Figura 24, observa-se que essas zonas correspondem a partes das regiões Sul e Sudeste do país e algumas cidades pertencentes ao zoneamento bioclimático 1 são: Curitiba-PR, Campos do Jordão-SP, Poços de Caldas-MG, São Joaquim-SC, Caxias do Sul- RS. Para o zoneamento bioclimático 2, têm-se

as cidades de: Pelotas-RS, Piracicaba-SP, Ponta Grossa-PR, São João Del Rei-MG, Nova Friburgo-RJ e Laguna-SC.

Figura 24 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005c).

Em outros trabalhos que avaliaram a influência da incorporação de resíduos vegetais, na condutividade térmica de tijolos de solo cimento, encontraram-se valores um pouco acima do determinado neste estudo. Ashour, Korjenic e Korjenic (2015) destacaram valores de condutividade térmica, para tijolos reforçados com palha de trigo e cevada, em porcentagem de 3%, iguais a 0,310 W/m.K e 0,314 W/m.K, respectivamente. Já Silva et al. (2010), analisando tijolos com casca de arroz substituindo 20% do percentual de cimento na mistura, encontraram valores de condutividade térmica iguais a 0,35 W/m.K .

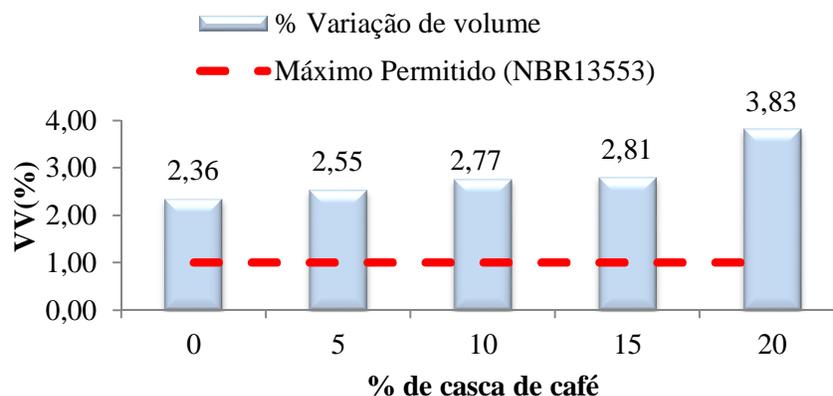
#### **4.12 Ensaio de Durabilidade**

A Figura 25 apresenta o resultado encontrado para variação volumétrica dos tijolos, ao final do sexto ciclo de molhagem e secagem. Ressalta-se que o percentual de variação volumétrica, encontrado para todos os tratamentos, foi maior que 1%, limite estabelecido pela NBR 13553 (ABNT, 2012d) para solos do tipo A4 em paredes monolíticas.

Souza (2011), analisando tijolos confeccionados com casca de arroz em substituição parcial do cimento, obteve percentuais de variação volumétricas, também, superiores à norma, observando a tendência de aumento, na variação do volume, conforme acréscimo de casca na mistura. O autor atribui o comportamento apresentado às próprias características físicas apresentadas pela casca de arroz.

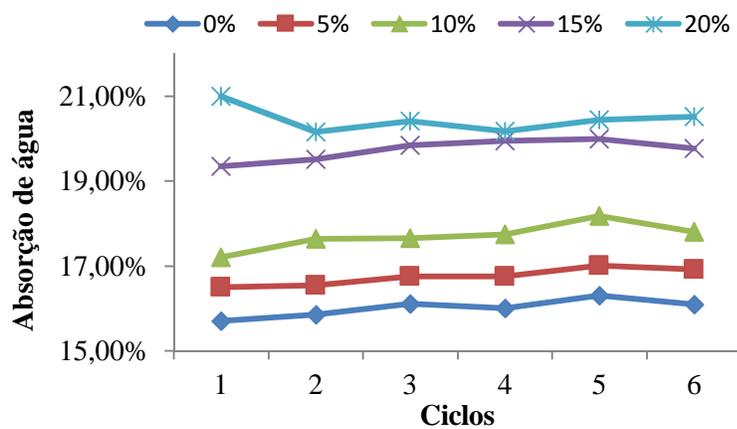
Quanto à absorção de água analisada, ao longo dos seis ciclos, pontua-se pelo gráfico da Figura 26, que a relação inversamente proporcional entre o teor de casca de café e o percentual de água absorvida, já constatada no ensaio de absorção, foi mantida e não houve grandes variações, ao longo dos ciclos. Essa constatação pode ser observada pela horizontalidade das curvas obtidas.

Figura 25 - Variação volumétrica ao longo dos ciclos de molhagem e secagem.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 26 - Absorção de água ao longo dos ciclos de molhagem e secagem.

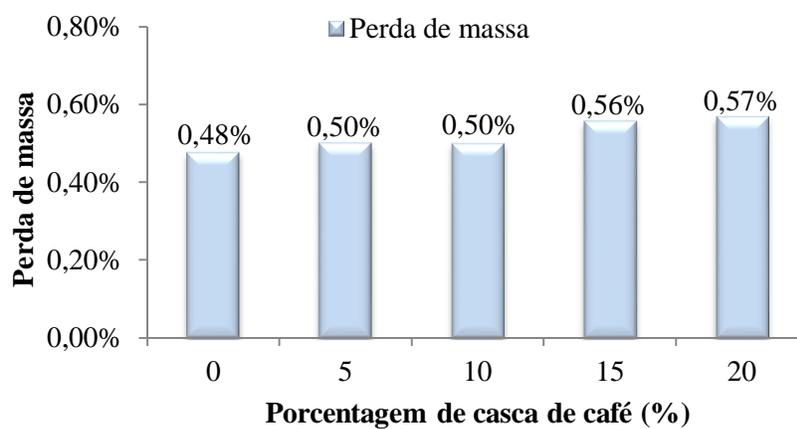


Fonte: Do autor (2017).

Os tijolos ensaiados apresentaram variações de peso de acordo com a Figura 27. Nota-se que, em nenhum dos tratamentos avaliados, a perda de massa foi superior a 10%, limite máximo estabelecido pela NBR 13553 (ABNT, 2012d). Percebe-se uma leve tendência de maiores perdas de massa para os

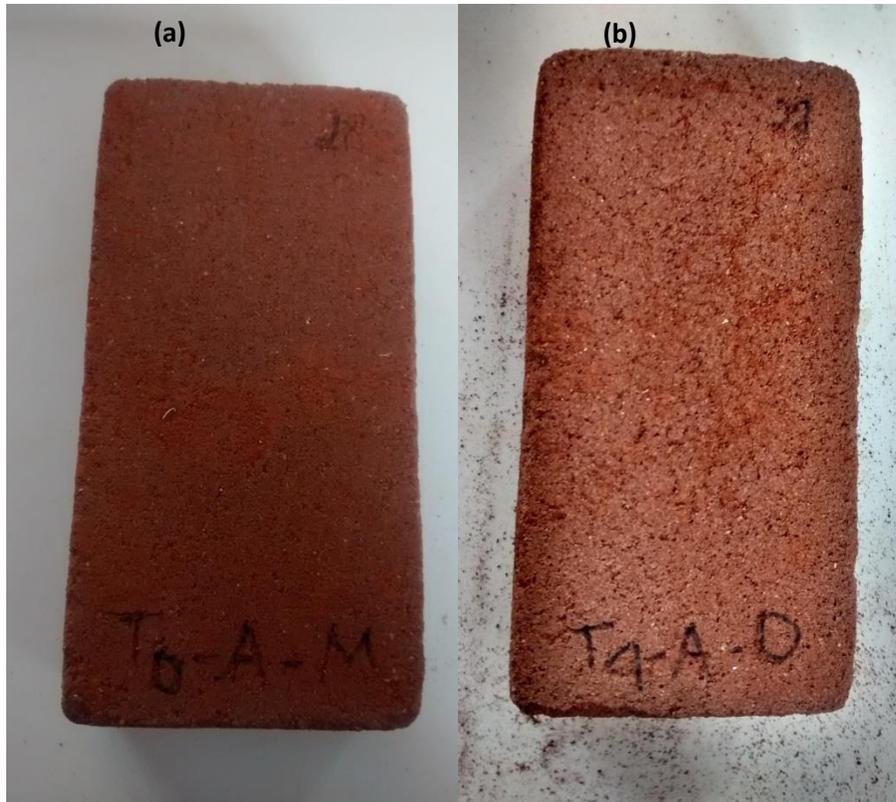
tratamentos com teores mais elevados de casca de café. Nenhum dos tratamentos avaliados apresentou trincas ou fissuras, após os ciclos de molhagem e secagem, observaram-se apenas desprendimentos de alguns grãos ao final do ciclo, mais acentuados nos tijolos do tratamento, contendo 20% de casca de café, conforme pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 27 - Perda de massa após ciclos de molhagem e secagem.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 28 - Aspecto dos tijolos após os seis ciclos de molhagem e secagem.



Fonte: Do autor (2017).

Legenda: (a) tratamento controle, (b) tratamento contendo 20% de casca de café em substituição ao cimento.

## 5 CONCLUSÕES

A substituição parcial do cimento por casca de café, na mistura de solo-cimento, com vista à fabricação de tijolos, teve impacto direto nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas do material.

Com relação às propriedades físicas, o acréscimo no teor de partícula promoveu a queda, na massa específica aparente seca e o aumento na absorção de água. O tratamento confeccionado sem adição de casca de café foi o único a obter valores inferiores a 20%, conforme recomenda a NBR 8491 (ABNT, 2012a).

O melhor resultado, para a resistência à compressão, foi observado para o tratamento sem adição de partículas de casca de café, aos 56 dias, o único com valor acima de 2,0 MPa, requisito mínimo, para esse tipo de material, de acordo com NBR 8491 (ABNT, 2012a). O avanço na idade dos tijolos teve efeito significativo, no desempenho mecânico, observando-se queda na resistência alcançada, a partir de teores acima de 10%.

Com relação ao ensaio de isolamento térmico, verificou-se que, apesar da variação de temperatura aumentar, conforme o acréscimo de partícula de casca de café, o que indica uma capacidade maior de isolamento térmico do material, essa variação não foi suficiente, para provocar uma redução na condutividade térmica, visto que todos os tratamentos apresentaram valores de condutividade iguais a 0,20 kJ/ W.m, valor bem inferior ao determinado na NBR 15220 (ABNT, 2005b), para tijolos cerâmicos com densidades correlatas às densidades dos tijolos fabricados no estudo, evidenciando a potencialidade de uso do material na melhoria do conforto térmico de edificações.

As variações volumétricas do material, após ciclos consecutivos de molhagem e secagem, foram superiores ao determinado pela NBR 13553 (ABNT, 2012d), porém a perda de massa ficou dentro dos limites normativos e não houve presença de trincas ou fissuras no material ao longo do ensaio.

Diante dos fatos elencados, verifica-se que a substituição do cimento por casca de café, nos percentuais estabelecidos nesta pesquisa, não apresentou valores satisfatórios, visando a atender os critérios de comercialização, determinados na NBR 8492 (ABNT, 2012b).

Entretanto não se pode descartar de início a utilização desse resíduo, uma vez que os resultados obtidos pelo tratamento controle, no quesito resistência à compressão, também, não foram os normalmente esperados, demonstrando que outros fatores influenciaram as propriedades dos tijolos, como inadequações nos mecanismos de produção.

Ainda, observa-se que a resistência à compressão alcançada, para percentuais de até 10% de substituição, foram superiores à resistência determinada para tijolos de adobe. Assim, os tijolos confeccionados neste estudo poderiam ser empregados, em substituição a estes, em construções mais simples.

## REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 1980. 115 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

ARAÚJO, M. H. **Comportamento térmico de blocos de terra comprimida ativados alcalinamente**. 2015. 139 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2015.

ASASUTJARIT, C. et al. Development of coconut coirbased lightweight cement board. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 21, p. 277-288, 2007.

ASHOUR, T.; KORJENIC, A.; KORJENIC, S. Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 59, p. 18-25, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2488-09**: standard practice for description and identification of soils: visual-manual procedure. West Conshohocken, 2009. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282-93**: standard practice for classification of soils and soil aggregate mixtures for highway construction purposes. West Conshohocken, 1993. 6 p.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook**: fundamentals. New York, 1993. 845 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 1986. 51 p. (ET-35).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. São Paulo, 2000. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991a. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735:** cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991c. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736:** cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991d. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737:** cimento Portland resistente a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** solo: determinação do teor de umidade do solo. Rio de Janeiro, 2016a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989:** pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491:** tijolo de solo-cimento: requisitos. Rio de Janeiro, 2012a. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492:** tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção da água: método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831:** cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833:** fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro, 2012c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991e. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989:** cimento Portland branco. Rio de Janeiro, 1993. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13116:** cimento Portland de baixo calor de hidratação. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553:** materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2012d. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554:** ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012e. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999:** papel cartão, pasta celulósica e madeira: determinação do resíduo (cinza) após incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853:** determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010b. 3 p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15220:** desempenho térmico de edificações: parte 1, definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a. 8 p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15220:** desempenho térmico de edificações: parte 2, método de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b. 34 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220:** desempenho térmico de edificações: parte 3, zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c. 30 p.

AZAMBUJA, M. A. **Geologia aplicada ao solo-cimento**. São Paulo: ABCP, 1979. 69 p.

BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 87-96, 2011.

BARBOSA, N.; MATTONE, R. Construção com terra crua. In: SEMINÁRIO IBERO AMERICANO DE CONSTRUÇÃO COM TERRA, 1., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador, 2002. 1 CD-ROM.

BARCELOS, A. F. et al. Características fermentativas de silagens de polpa de café com diferentes proporções de casca de café. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 70, n. 3, p. 206-214, 2013.

BARCELOS, A. F.; GONCALVES, C. C. M. Aproveitamento da casca de café na alimentação animal. In: \_\_\_\_\_. **Café Arábica: da pós-colheita ao consumo**. Brasília, DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2011. v. 2, p. 97-168.

BÁRTHOLO, G. F. et al. Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 14, n. 162, p. 33-44, 1989.

BERTOLINI, M. S. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para a aplicação como composições termoacústicas**. 2014. 256 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BILBA, K.; ARSENE, M. A.; OUENSANGA, A. Study of banana and coconut fibers: botanical composition, thermal degradation and textural observations. **Bioresource Technology**, Essex, v. 98, n. 1, p. 58-68, 2007.

BLUCHER, E. **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários**. São Paulo: Blucher, 1951. v. 1, 620 p.

BRAGA FILHO, W. **Transmissão de calor**. São Paulo: Thomson, 2004. 614 p.

BRAJA, M. das. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 559 p.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 1999. 131 p.

CABALA, G. V. E. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçadas com fibras de coco e hastes de bambu**. 2007. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

CAPECHE, C. L. **Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2008. 6 p. (Comunicado Técnico, 51).

CARVALHO, S. T. M. **Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de canade-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari, 1999. 116 p.

CHAIB, H.; KRIKER, A.; MEKEHERMECHE, A. Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers. **Energy Procedia**, New York, v. 74, p. 919-925, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café safra 2015: quarto levantamento**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

CORREIA, C. M. P. **Conforto termo-acústico de uma habitação de baixo custo**. 2009. 93 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CYTRYN, S. **Soil construction: its principles and application for housing**. Jerusalem: The Weizman Science Press of Israel, 1957. 183 p.

DULTRA, E. J. V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café (*Coffea canephora*) em massa cerâmica para porcelanato.** 2013. 135 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

FAN, M. et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 36, p. 135-140, 2012.

FARIA, J. R. G. **Unidade de produção de tijolos de solo estabilizado.** 1990. 94 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

FERRARI, V. J. et al. Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com solo da Região do Arenito Caiuá do Paraná. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 131-148, jul./set. 2014.

FERREIRA, R. C.; GOBO, J. C.; CUNHA, A. H. N. A. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2008.

FREITAS, W. L. C. **Estudo da casca de café como matéria prima em processos fermentativos.** 2016. 118 p. Teses (Doutorado em Microbiologia Aplicada)-Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2016.

FRYBORT, S. et al. Cement bonded composites: a mechanical review. **Bioresources**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008.

GOUVEA, A. B. M. Feability of ethanol production from coffe husks. **Biotechnology Letters**, Dordrecht, v. 31, n. 9, p. 1315-1319, 2009.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** 2003. 148 p. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na construção civil.** São Paulo: Pini, 1998. 341 p.

HIGHWAY RESEARCH BOARD. **Soil stabilization with Portland Cement**. Washington, 1961. 212 p. (Bulletin, 292).

INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. **Cultura de café no Brasil**: manual de recomendações. 4. ed. Rio de Janeiro, 1981. 503 p.

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA. **NTE E.080**: regulamento. Lima: Nacional Construcciones, 2000. 17 p.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: GEN/LTC, 2008. 643 p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization**: principles and practice. Sidney: Butterworths, 1972. 374 p.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandise Eucalyptus dunniina* produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68-74, 2008.

LINS, A. H. P. Comportamento de tensão- deformação- resistência dos solos compactados não saturados. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21., 1994, Salvador. **Anais...** Salvador, 1994. p. 160-175.

LINS, L. N. **Estudo da aplicação de casca de café na indústria da construção**. 2006. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

MACEDO, C. F.; TAVARES, L. H. S. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações. **Botânica Instituto de Pesca**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 149-163, 2010.

MILANI, A. P. da S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. 2005. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MILANI, A. P. da S.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 1-10, 2006.

NASCIMENTO, C. M. **Estudo da fibra de coco como reforço em tijolo de solocimento**. 2011. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

NAVYA, P. N.; MURTHY, P. S. Production, statistical optimization and application of endoglucanase from *Rhizopus stolonifer* utilizing coffeehusk. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, New York, v. 36, n. 8, p. 1115-1123, 2012.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DA PAVIMENTAÇÃO, 18., 1983, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1983. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, F. C. **Oxidação da lignina proveniente de resíduos lignocelulósicos agroindustriais para a obtenção de composto químicos aromáticos de maior valor agregado**. 2015. 199 p. Tese (Doutorado em Conversão de Biomassa)-Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 385 p.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 367 p.

PITTA, M. R. Retração do solo-cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 17., 1982, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF, 1982. p. i1-i67.

PORRAS, A. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. 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, 2008. Disponível em: <<http://uaemex.mx/redalyc/src/inicio/HomRevRed.jsp?iCveEntRev=911>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland**: estudo da pasta. 2008. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RAHIMI-AGHDAM, S.; BAFIANT, Z. P.; ABDOLHOSSEINI QOMI, M. J. Cement hydration from hours to centuries controlled by diffusion through barrier shells of C-S-H. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Providence, v. 99, p. 211-224, 2017.

ROCHA, A. F. **Estudo experimental sobre misturas de solo-cimento para a região de Campo Novo de Parecis, MT.** 1996. 114 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

RODRIGUES, F. N. **Caracterização de resíduo de estação de tratamento da UFLA e aproveitamento na confecção de tijolos de solo-cimento.** 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Hidrologia e Saneamento Ambiental)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SABBAG, P. Y. **Solo cimento: o estudo da retração e suas implicações.** 1986. 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

SALA, L. G. **Proposta de habitação sustentável para estudantes universitários.** 2006. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006.

SANTOS, N. R. G. **Caracterização mecânica, térmica e acústica de um compósito que utiliza rejeitos de mármore, granito e eps para a fabricação de blocos para construção civil.** 2014. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SANTOS, R. C. et al. Utilização de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) na produção de painéis aglomerados com adição de PET. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 149-158, jan./mar. 2011.

SAVASTANO, H. J. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** 2000. 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil)-Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2000.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. Cluster analysis methods four grouping, means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SEDAN, D. et al. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of Europe Ceramic Society**, Oxford, v. 28, p. 183-192, 2008.

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

SEGANTINI, A. A. S.; CARVALHO, D. de. Aplicação de solocimento em elementos de fundação: evolução da Pesquisa em Ilha Solteira-SP. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 4., 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2000. p. 339-348.

SERRANO, J. S.; CASTRO, J. V. Materiales de construcción com propiedades aislantes a base de cascara de arroz. In: **Informes de la Construcción**, Instituto Eduardo Torroja, Madri, v. 37, n. 372, p. 53-64, 1985.

SILVA, A. P.; JOSÉ, F. J.; BERALDO, A. L. Estudos para viabilizar o uso de resíduos agro-industriais em compósitos à base de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2004. p. 1-11.

SILVA, M. S. **A terra crua como alternativa sustentável para a produção de habitação social.** 2001. 129 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2001.

SILVA, S. R. **Tijolo de solo-cimento reforçado com serragem de madeira.** 2005. 202 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, M. W. et al. Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. **Anais...** Canela, 2010. 1 CD-ROM.

SILVEIRA, A. **Estabilização de solos com cimento:** síntese de notas de aula. São Carlos: EESC-USP, 1996. 44 p.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Effect of incorporation of grits waste on the densification behavior of soil-cement bricks. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 360, p. 414-419, 2015.

SOUZA, F. **Estudo da durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz**. 2011. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2001. 255 p.

SUDIN, R.; SWANY, N. Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. **Journal Material Science**, New York, v. 41, p. 6917-6924, 2006.

SUTAS, J.; MANA, A.; PITAK, L. Effect of rice husk and rice husk ash to properties of bricks. **Procedia Engineering**, New York, v. 32, p. 1061-1067, 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2<sup>nd</sup> ed. London: T. Telford, 1998. 459 p.

TEIXEIRA, M. N. M. **Determinação da degradabilidade in situ das diferentes frações da casca do grão de três cultivares de café (*Coffea arabica* L.)**. 1999. 44 p. Dissertação (Mestrado em Nutrição de Ruminantes)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Rio de Janeiro: Sedegra, 1961. 16 p.

TURGUT, P.; ALGIN, H. M. Limestone dust and wood sawdust as brick material. **Building and Environment**, Oxford, v. 42, n. 9, p. 3399-3403, 2007.

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. I. T. A. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Journal Ceramics Silikaty**, Prague, v. 50, n. 2, p. 115-122, 2006.

VALE, A. T. et al. Caracterização energética e rendimento de carbonização e resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*) e madeira (*Cedrelinga catenaeformis*). **Revista Cerne**, Viçosa, MG, v. 13, p. 416-420, 2007.

VENTURIM, J. B. **Gestão de resíduos orgânicos produzidos no meio rural: o caso do beneficiamento do café**. 2002. 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

VLACK, L. H. van. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. São Paulo: EDUSP; E. Blucher, 1973. 317 p.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement. **Forest Product Journal**, Madison, v. 14, p. 567-570, 1964.

ZAK, P. et al. The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 106, p. 179-188, 2016.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 118 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

## ANEXO A - TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DO CIMENTO

Nome técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento portland comum (NBR 5732)	Cimento portland comum	CP I	25	CP I-25
			32	CP I-32
	40		CP I-40	
	Cimento portland comum com adição	CP I-S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
Cimento portland composto (NBR 11578)	Cimento portland composto com escória	CP II-E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento portland composto com pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
Cimento portland composto com filler	CP II-F	25	CP II-F-25	
		32	CP II-F-32	
		40	CP II-F-40	
Cimento portland de alto-forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III-25
			32	CP III-32
			40	CP III-40
Cimento portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV-25
			32	CP IV-32
Cimento portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS etc.
Cimento portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC etc.
Cimento portland branco (NBR 12989)	Cimento portland branco estrutural	CPB	25	CPB-25
			32	CPB-32
	Cimento portland branco não estrutural	CPB	-	CPB
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP - classe G

Fonte: ABNT (1991a, 1991b, 1991c, 1991d, 1991e, 1992, 1993, 1994, 2006)

**ANEXO B - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO HRB, NORMALIZADO  
PELA ASTM-D3282 (ASTM, 1993).**

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)						
	A-1		A-3	A-2			A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-7-5 / A-7-6			
Peneiração: % que passa:														
Nº 10	50 máx.													
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.											
Nº 200 (p)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.			
Características da fração que passa nº 40														
Limite de Liquidez - LL (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.		
Índice de Plasticidade	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.		
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.				
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia	Areia fina	Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa			Solos Siltosos	Solos Siltosos	Solos argilosos					
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre						

**SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO HRB, NORMALIZADO PELA ASTM-D3282 (ASTM, 1993).**

<b>GRUPO/ SUBGRUPO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
A-1	Mistura bem graduada de fragmentos de pedra e pedregulho, areia grossa, areia média, areia fina com ou sem material fino, não plástico ou fracamente plástico.
A-1a	Predomínio de fragmentos de pedra ou pedregulho com ou sem material fino, bem graduado (menos de 50% passa #10, menos de 30% passante #40 e menos de 15% passante #200, IP 6.
A1-b	Predomínio de areia grossa a média, com ou sem material fino, bem graduado (menos de 50% passante #40 e menos de 10% passante #200, IP 6.
A-3	Areias finas de praia ou deserto, sem material siltoso ou argiloso ou com muita pequena quantidade de silte não plástico e areia fina fluvial, mal graduada, com pouco areia grossa e pedregulho (menos de 50% passante #40 e menos de 10% passante na #200, NP.
A-2	Solos granulares variados, com graduação irregular e pouco material fino, que não se enquadram nas classes A-1 e A-3 pela maior % passante na #40 e/ ou plasticidade.
A-2-4 e A-2-5	Materiais granulares cuja fração passante #40 apresenta características dos solos A4 (A-2-4) e A-5 (A-2-5). Inclui também pedregulhos com % de silte e IP acima dos limites para o solo A-1 e areia fina com % de silte não plástico acima dos limites para o solo A-3.
A-2-6 e A-2-7	Semelhantes aos solos A-2-4 e A-2-5, exceto que a fração passante #40 apresenta argila plástica, tendo características dos

	solos A-6 (A-2-6 e A-7 (A-2-7).
A-4	Solos siltosos não plásticos ou moderadamente plásticos, com % passante na # 200 $\times$ 35%.
A-5	Solos semelhantes ao solo A-4, com material diatomáceo, podendo ser altamente elástico (alto valor de wl).
A-6	Solos argilosos com % passante na #200 $\times$ 35% podendo incluir misturas argilo-arenosas com até 64% de areia e pedregulho, sujeitos a grandes variações volumétricas.
A-7	Semelhantes aos solos A-6, porém mais elásticos, com alto wl e grandes variações volumétricas.
A-7-5	Solos com moderado IP em relação ao wl.
A-7-6	Solos com alto IP em relação ao wl.