



ALAN PEREIRA VILELA

**TIJOLO SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM PARTÍCULAS
VEGETAIS E RESÍDUO DE MINERAÇÃO**

**LAVRAS – MG
2019**

ALAN PEREIRA VILELA

**TIJOLO SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM PARTÍCULAS VEGETAIS E
RESÍDUO DE MINERAÇÃO**

Tese 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 Doutor.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes (UFLA) – Brasil
Orientador

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro (UFLA) – Brasil
Coorientador

**LAVRAS – MG
2019**

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

Vilela, Alan Pereira.

Tijolo solo-cimento reforçado com partículas vegetais e resíduo
de mineração / Alan Pereira Vilela. - 2019.

94 p. : il.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Coorientador(a): André Geraldo Cornélio Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Sustentabilidade. 2. Propriedades físico-mecânica e
condutividade térmica. 3. Construção civil. I. Mendes, Rafael
Farinassi. II. Ribeiro, André Geraldo Cornélio. III. Título.

ALAN PEREIRA VILELA

**TIJOLO SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM PARTÍCULAS VEGETAIS E
RESÍDUO DE MINERAÇÃO**

**REINFORCED SOIL-CEMENT BRICK WITH VEGETABLES PARTICLES AND
MINING WASTE**

Tese 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 Doutor.

APROVADA em 18 de dezembro de 2019.

Dr. David Cardoso Dourado	UNIFESSPA
Dr. Raphael Nogueira Rezende	IFSULDEMINAS
Dr ^a . Joelma Rezende Durão Pereira	UFLA
Dr. Maykmiller Carvalho	UFLA

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro
Coorientador

**LAVRAS – MG
2019**

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pelas oportunidades a mim concedidas.

À minha querida mãe Gislaine que me fortalece todos os dias e ao meu pai Donizete, pelo amor, incentivo e por proporcionar meios para conseguir meus objetivos.

À minha irmã Ana Carolina pelo carinho e amizade de sempre.

À minha esposa Paula e ao meu filho Pedro, pelo amor incondicional, companheirismo e paciência, transmitidos durante esses anos de estudos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT) pela oportunidade de realizar o doutorado.

À Capes, pela concessão da bolsa. A FAPEMIG e ao CNPq.

Ao professor e amigo, Dr. Rafael Farinassi Mendes, pela orientação, amizade e por todo conhecimento repassado durante 8 anos de convivência.

Ao professor, Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro, pela amizade, co-orientação e ajuda na realização dos ensaios e ao professor, Dr. Lourival Marin Mendes, pelo companheirismo e ensinamentos.

Aos professores do Departamento de Engenharia – ABI pela amizade e troca de conhecimentos.

Aos amigos e funcionários da UEPAM, em especial, Tony, Danillo, Fernando e Arlei, pelo companheirismo e pelos momentos de descontração vivenciados.

Aos meus familiares e amigos, pelas alegrias que passamos juntos.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O aproveitamento de resíduos, industriais ou agroindustriais, no setor da construção civil é uma opção ambientalmente correta e economicamente viável. Resíduos de mineração e resíduos vegetais, são exemplos de resíduos estudados para a produção de materiais alternativos na construção civil, tendo em vista a alta disponibilidade desses rejeitos. O tijolo solo-cimento se destaca como importante material alternativo para a construção de moradias. Composto basicamente por solo, cimento *Portland* e água, esse material se torna sustentável, se comparado ao tijolo convencional, pelo fato da remoção da queima durante seu processo produtivo. Os objetivos deste estudo foram produzir, caracterizar e avaliar o comportamento físico, mecânico e térmico de tijolos solo-cimento confeccionados com diferentes tipos e percentuais de resíduo sólido de mineração e resíduos vegetais. Foram produzidos tijolos com substituição de diferentes porcentagens (0, 10, 20, 30 e 40%) de solo pelo resíduo de mineração, bem como a inserção de 1,5% (em massa) de partículas vegetais (*Eucalyptus grandis*, *Pinus oocarpa*, casca de café e bagaço de cana) na matriz, sendo a mesma constituída por uma mistura de solo (classificação A-4) e cimento CPV – ARI. As propriedades tecnológicas como densidade aparente, absorção de água, perda de massa por imersão, resistência à compressão, condutividade térmica e a microestrutura, antes e após o envelhecimento acelerado foram determinadas. Os resultados experimentais indicaram que a adição de resíduos de mineração influenciou o comportamento dos tijolos de cimento no solo. Além disso, os resíduos podem ser incorporados ao tijolo em uma proporção de até 40%, considerando os padrões atuais de caracterização. Com relação a substituição do solo por partículas vegetais, os resultados indicaram influência negativa nas propriedades físicas dos tijolos, entretanto todos os tratamentos atenderam as especificações das normas de comercialização do produto. Os tratamentos com casca de café e bagaço de cana, apresentaram valores de resistência à compressão inferiores ao estabelecido por norma, embora foram aqueles com melhores propriedades de isolamento térmico. Os tijolos produzidos com partículas de pinus obtiveram os melhores resultados, levando em consideração as normas vigentes de caracterização. Sendo assim, buscou-se a criação de um novo produto com adequadas propriedades físicas e mecânicas associadas ao conforto térmico para aplicação no setor de construção civil.

Palavras-chave: sustentabilidade, propriedades físico-mecânica, condutividade térmica, construção civil

ABSTRACT

The use of industrial or agro-industrial residues in civil construction is an environmentally correct and economically viable option. Mining and plant residues are some of those studied to produce alternative civil construction materials given the high availability of these residues. The soil-cement brick is prominent as an important alternative material for the construction of houses. This material, basically composed of soil, Portland cement, and water, is sustainable when compared to conventional brick since the burn is removed during its production process. The objectives of this study were to produce, characterize, and evaluate the physical, mechanical, and thermal behavior of soil-cement bricks made with different types and percentages of solid mining and plant residues. The bricks were produced by replacing different percentages (0, 10, 20, 30, and 40%) of soil for mining residue, as well as adding 1.5% (in mass) of plant particles (*Eucalyptus grandis*, *Pinus oocarpa*, coffee husk, and sugarcane bagasse) to the matrix, which consists of a mixture of soil (A-4 classification) and CPV - ARI cement. We determined the technological properties such as bulk density, water absorption, loss of mass by immersion, resistance to compression, thermal conductivity, and microstructure, before and after accelerated aging. The experimental results indicated that the addition of mining residue influenced the behavior of cement bricks in the soil. Furthermore, the residue can be incorporated into the brick in a proportion of up to 40%, considering the current characterization standards. Regarding the replacement of soil by plant particles, the results indicated a negative influence on the physical properties of the bricks. However, all treatments met the specifications of the product's marketing standards. The treatments with coffee husk and sugarcane bagasse presented resistance to compression values inferior to the established by the norm, although they presented the best thermal insulation properties. The bricks produced with pine particles obtained the best results, considering the current characterization standards. Therefore, we sought to create a new product with adequate physical and mechanical properties associated with thermal comfort for the application in civil construction.

Keyword: sustainability, physical-mechanical properties, thermal conductivity, civil construction

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo Geral	10
2.2 Objetivos específicos	10
3 REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1 Solo como material de construção	11
3.2 Cimento Portland	11
3.3 Solo-cimento	12
3.4 Tijolo solo-cimento	14
3.5 Rejeito de mineração	16
3.6 Resíduos lignocelulósicos	17
3.7 Compósitos cimentícios com resíduos lignocelulósicos	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	31
ARTIGO 1 - Properties of soil-cement bricks produced with mining waste	32
1 INTRODUCTION	34
2 MATERIALS AND METHODS	35
2.1 Materials	35
2.1.1 Mining Waste	35
2.1.2 Soil and Cement	36
2.2 Methods	37
2.2.1 Experimental procedure and production of bricks	37
2.2.2 Ageing of bricks	39
2.2.3 X-ray diffraction (XRD)	39
2.2.4 Determination of the physical, mechanical and microstructural properties of bricks	39
3 RESULTS AND DISCUSSION	40
3.1 Pozolanic activity index of the mining waste	40
3.2 Compaction characteristics	41
3.3 Physical characterization of bricks	42
3.3.1 Dry density, moisture content and degree of compaction	42

3.3.2 Water absorption and mass loss by immersion	44
3.4 Mechanical characterization of bricks	47
3.4.1 Compressive strength	47
3.5 Thermal Conductivity	49
4 CONCLUSION	51
ACKNOWLEDGEMENTS	51
REFERENCES.....	51
ARTIGO 2 - Inserção de partículas vegetais na produção de tijolo solo-cimento com resíduos de mineração.....	54
1 INTRODUÇÃO	57
2 MATERIAL E MÉTODOS	59
2.1 Material	59
2.1.1 Solo e cimento	59
2.1.2 Resíduo de mineração	60
2.1.2 Partículas vegetais	61
2.2 Métodos	63
2.2.1 Moldagem e caracterização dos tijolos solo-cimento.....	63
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.1 Solo e resíduo de mineração	67
3.2 Caracterização das partículas vegetais.....	70
3.3 Caracterização física e mecânica dos tijolos	72
3.4 Caracterização térmica dos tijolos.....	82
4 CONCLUSÃO.....	84
AGRADECIMENTOS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil busca novos conceitos e soluções técnicas que visam à sustentabilidade em seu processo, tendo em vista a escassez dos recursos naturais e a preservação ambiental. Ademais, o setor da construção civil, busca solucionar problemas relacionados à otimização de recursos e à redução de seus custos, sejam eles oriundos de sua extração, transporte ou aplicação (MILANI; BARBOZA, 2016).

O crescimento do setor da construção civil acarreta no aumento do consumo de matéria-prima para produção de materiais empregados na fabricação dos sistemas de alvenarias, tornando, assim, necessário o desenvolvimento de produtos alternativos que possam contribuir de forma quantitativa e qualitativa para este setor. Vários estudos têm sido desenvolvidos sobre a incorporação de resíduos nos materiais de construção, até mesmo substituindo produtos já consagrados, como a areia e o cimento *Portland*, seja de forma parcial ou total (CASTRO et al., 2016; CHAIB; KRIKER; MEKEHERMECHE, 2015; SEKHAR; NAYAK, 2018).

Nesse cenário se enquadram os tijolos solo-cimento (tijolos ecológicos), produzidos a partir de uma mistura homogênea de solo, cimento e água (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2000). Segundo Oliveira, Amaral e Schneider (2014), em meio as inúmeras vantagens da utilização de tijolos solo-cimento destacam-se, a utilização de matéria prima natural de alta disponibilidade e de baixo custo, o solo. A incorporação de resíduos em matrizes cimentícias vêm ganhando destaque em diversas pesquisas, tendo como principal finalidade a destinação adequada para esses rejeitos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) regulamenta o manejo ambientalmente correto dos resíduos gerados em diversos setores industriais e define metas de reciclagem e redução, sendo assim, o setor da construção civil busca alternativas ambientalmente correta para destinação do resíduo gerado.

Embora pouco explorado neste quesito, o resíduo sólido obtido no processo de mineração, responsável pela geração de 1,5 toneladas para cada tonelada de minério de ferro obtida, deve ser levado em consideração nas pesquisas envolvendo matrizes cimentícias (ALVES; BALDO, 1998; PEREIRA JÚNIOR, 2011; SILVEIRA, 2015). Entretanto, os produtos oriundos dessa mistura são tipicamente caracterizados como frágeis, abrindo espaço para estudos que visam a inserção de fibras vegetais como reforço em matrizes cimentícias (COUTTS, 2005; LIMA et al., 2007; LOPES et al., 2011).

Diversos estudos apontam que compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais apresentam valores de resistência à tração e ao impacto elevados, maior controle de fissuras, além de reduzir a massa específica do material contribuindo para a redução da condutividade

térmica do produto (IKAI et al., 2010; KHEDARI; KRIKER; MEKEHERMECHE, 2005; TEIXEIRA, 2010; TONOLI, 2009; TONOLI et al., 2013). Alguns pesquisadores, como Algin e Turgut (2008), Chaib, Kriker e Mekehermeche (2015), Sutas, Mana e Pitak (2012) e Zak et al. (2016), obtiveram resultados satisfatórios na produção de tijolos solo-cimento incorporados com diversos tipos de fibras e partículas vegetais.

A utilização dos resíduos de mineração e resíduos agrícolas na produção de compósito a base de cimento acarretam, além da melhoria das propriedades do produto, uma disponibilização de matérias-primas alternativas, destinação adequada e agregação de valor aos mesmos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da utilização de diferentes tipos e porcentagens de resíduos sólidos de mineração e resíduos lignocelulósicos sobre a qualidade de tijolos solo-cimento. Dessa forma, objetivou-se a criação de um produto com adequadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas que permitirá aplicação no setor de construção civil.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar e compreender o efeito da composição química, anatômica e física dos resíduos lignocelulósicos (pinus, eucalipto, casca de café e bagaço de cana) e resíduos sólidos de mineração sobre a cura do cimento e as propriedades finais de tijolos solo-cimento;
- Determinar propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do novo material, tendo por referência as especificações de normas técnicas e os resultados de estudos correlatos;
- Avaliar e entender o efeito da adição de diferentes porcentagens, de cada tipo de resíduo, sobre a condutividade térmica dos tijolos.
- Reduzir o passivo ambiental causado pelo destino incorreto dos resíduos da cadeia produtiva agrícola quanto da indústria da mineração.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Solo como material de construção

A construção empregando solo foi a primeira solução encontrada pelo homem primitivo para construir abrigos eficientes contra as intempéries do meio ambiente, principalmente em locais de difícil manuseio de madeiras e rochas (CYTRYN, 1957). Souza (2006) afirma que a mistura de solo, rochas e madeira foi sem dúvida o material que serviu de apoio para a construção, devido à facilidade de aquisição e grande disponibilidade dessas matérias-primas. No Brasil, a utilização do solo como material de construção pode ser observada em grande parte das cidades históricas brasileiras, como Ouro Preto, Diamantina, São João Del Rei, dentre outras.

Santiago (2001) cita algumas formas de classificação das construções utilizando o solo como elemento construtivo, sendo elas: a construção com solo processada e não processada. Na primeira classificação, o solo é utilizado como se encontra na natureza, ou seja, no estado sólido (compactado naturalmente), alguns exemplos são os solos escavados, os torrões de solo cortados e os blocos cortados. A segunda classificação parte do princípio que o solo precisa ser trabalhado antes de ser empregado no sistema construtivo, podendo se encontrar em estados híbridos diferentes, como é o caso do solo derramado, modelado, empilhado, sobre estrutura, solo-palha, adobe ou solo de enchimento.

3.2 Cimento Portland

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados pela sociedade. A resistência mecânica, o custo relativamente baixo, a versatilidade de formas e a rapidez na execução, fazem com que este produto seja indispensável em obras civis, como: barragens, estradas, edificações, pontes, artefatos de concreto e até mesmo em obras de arte (PEREIRA JÚNIOR, 2011). Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2000), este material pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), o cimento Portland possui partículas de tamanho entre 1µm e 50µm, resultantes da moagem do clínquer. O clínquer apresenta em sua constituição uma mistura de óxidos formados em altas temperaturas, entre eles estão: C₂S (silicato dicálcico), C₃S (silicato tricálcico), C₃A (aluminato tricálcico) e C₄AF (ferro aluminato tretacálcico).

Os tipos de cimento se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004), no mercado brasileiro são encontrados oito tipos básicos de cimento, que atendem a diferentes tipos de empreendimentos, são eles:

- CP I e CP I S – Cimento Portland Comum e Cimento Portland Comum com Adição, respectivamente;
- CP II E, CP II Z, CP II F – Cimento Portland Composto com Escória, Cimento Portland Composto com Pozolana, Cimento Portland Composto com Fíler, respectivamente.
- CP III – Cimento Portland de Alto-forno;
- CP IV – Cimento Portland Pozolânico;
- CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) e
- CPB – Cimento Portland Branco.

Dessa maneira a função dos cimentos em mistura com a água é aglomerar partículas (agregados) e ligá-las pela formação de produtos hidratados com o desenvolvimento da resistência mecânica (CINCOTTO, 2011).

3.3 Solo-cimento

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2000), o solo-cimento é um produto com propriedades físicas e mecânicas desejáveis, obtido por meio da mistura íntima de solo, cimento e água em proporções previamente estabelecidas, sendo o solo o componente que entra em maior quantidade na obtenção deste produto. Alguns fatores influenciam a qualidade do solo-cimento, sendo eles: tipo do solo, teor de cimento, método de mistura e compactação. De acordo com Souza (2006), o tipo do solo é o fator que possui maior influência na qualidade final do produto.

Os solos mais adequados para a fabricação de elementos construtivos do tipo solo-cimento são aqueles que possuem algumas características como: isentos de matéria orgânica, índice de plasticidade menor ou igual a 18%, limite de liquidez menor ou igual a 45% e granulometria variando entre 100% do solo passante na peneira de 4,8 mm e 10 a 50% passante na peneira de 0,075 mm (ABCP, 1985). A Tabela 1 apresenta as faixas granulométricas consideradas ideais para a mistura solo-cimento de acordo com diferentes autores.

Tabela 1 - Faixas granulométricas ideais para solo-cimento

Autores	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Silte + argila (%)
CINVA (1963)	45-80	-	-	20-25
PCA (1969)	65	-	-	10-35
ICPA (1973)	60-80	10-20	5-10	-
MAC (1975)	40-70	< 30	20-30	-
CEPED (1984)	45-90	-	< 20	10-55

Fonte: Segantini (2000).

Bueno e Vilar (1999) afirmam que o grau de compactação, ou seja, relação entre a massa específica seca do material e a massa específica seca aparente máxima obtida pelo ensaio de compactação Proctor Normal, é um importante índice para determinar a qualidade de compactação da mistura solo-cimento. Os autores afirmam que o grau de compactação entre 95% e 105% é o ideal. Segundo Souza et al. (2008), a umidade ótima é um parâmetro muito importante nas pesquisas realizadas utilizando o solo, pois propicia melhores condições de trabalhabilidade e máxima compactação do material, proporcionando assim, maiores valores de densidade, resistência e durabilidade.

De acordo com a ABCP (1985), o cimento deve ser adicionado na mistura em quantidades que variam de 5% a 10% da massa do solo, o suficiente para estabilizá-lo e conferir-lhe as propriedades de resistência desejadas. Milani e Freire (2006), afirmam que no processo de estabilização do solo com o cimento, as reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, dão origem a um gel que preenche parte dos vazios da massa e unem os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe a resistência inicial.

A utilização de cimento como estabilizante para solos, tende a melhorar algumas propriedades do material, tais como resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica ao longo do tempo (ABIKO, 1980). O autor ainda relata que a quantidade de cimento a ser adicionada ao solo para componentes de alvenaria deve corresponder aos traços de 1:10, 1:12 e 1:14 (cimento:solo seco, em volume) para solos arenosos e adição de 5% a 10% (em massa) de óxido de cálcio para solos argilosos.

O solo-cimento é classificado em duas categorias, sendo elas: SCC (solo-cimento compacto) e SCP (solo-cimento plástico), sendo a principal diferença entre elas, a quantidade de água adicionada na mistura e sua aplicabilidade. Na primeira categoria, a água deve ser adicionada de modo que se obtenha a compactação máxima, favorecendo assim, as reações de hidratação do cimento. Já na segunda categoria, a adição de água deve ser realizada até se obter

uma mistura de consistência plástica, de aspecto similar ao de uma argamassa de emboço (FERRAZ, 2004).

A mistura solo-cimento pode ser utilizada na execução de contrapisos, fundações, tijolos, blocos, paredes monolíticas, dentre outros. Em comparação com os materiais de construção convencionais, os tijolos solo-cimento oferecem inúmeras vantagens para a construção residencial de baixo custo, tais como: maximizam a utilização de materiais locais, aplicação de métodos construtivos simples, além de oferecerem um elevado isolamento térmico e acústico (WALKER, 1995).

Pelo fato de serem produzidos por prensagem, seguida de cura e secagem, não sendo necessário o processo de queima, os tijolos solo-cimento também são conhecidos como tijolos ecológicos. Segundo Oti e Kinuthia (2012), esta tecnologia além de reduzir o uso de energia e emissões de dióxido de carbono, minimiza o consumo de recursos naturais e possibilita materiais mais eficientes para a indústria da construção civil. Apesar das inúmeras vantagens, Silva (2005) afirma que, a grande variedade de solos existentes é a principal desvantagem na utilização deste material.

3.4 Tijolo solo-cimento

Uma das alternativas para a construção da alvenaria em habitações visando à otimização de recursos, são os tijolos solo-cimento ou tijolos ecológicos.

O tijolo solo-cimento é composto basicamente de solo, cimento e água, com baixa porosidade e elevada densidade em função do empacotamento dos grãos do solo depois de compactados (FARIA, 1990; VAN VLACK, 1973). O processo de fabricação dos tijolos ecológicos abrange as seguintes etapas:

- a) Preparação do solo: etapa na qual o solo é destorroado e peneirado;
- b) Preparo da mistura: com o solo preparado, deve ser adicionado cimento com o objetivo de obter uma mistura homogênea, em seguida, adiciona-se água e mistura-se o material até uniformizar-se a umidade do solo;
- c) Moldagem dos tijolos: pode ser efetuada em prensas manuais ou hidráulicas;
- d) Cura e armazenamento: durante os primeiros sete dias os tijolos devem ser mantidos úmidos.

A escolha do solo adequado para produção dos tijolos solo-cimento influencia diretamente na qualidade e no custo do produto final, tendo em vista que, o solo é o componente de maior proporção na mistura. A NBR 10833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS – ABNT, 2012a), estabelece os critérios para a escolha do solo e fabricação de tijolos solo-cimento, utilizados em alvenaria (Tabela 2).

Tabela 2 - Critérios para a escolha do solo

Características	Requisitos
% 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%
Limite de Liquidez	≤ 45%
Índice de Plasticidade	≤ 18%

Fonte: NBR 10833 (ABNT, 2012a).

A Tabela 3 apresenta o teor de cimento relacionado a classificação do solo (Highway Research Board - H.R.B.), para a produção de tijolos solo-cimento.

Tabela 3 - Teor de cimento

Classificação H.B.R.	Teor de cimento em peso (%)
A1 – a	5
A1 – b	6
A2	7
A3	8
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: ABCP (1985).

A qualidade do produto final depende de uma série de fatores sobre a matéria-prima, o processo de produção bem como o produto final. Os fatores comuns incluem o controle do solo (homogeneidade e tamanho das partículas), controle de umidade (do solo e da mistura) e controle de produto (controle dimensional, resistência mecânica e durabilidade). A NBR 8491 (ABNT, 2012b) apresenta alguns requisitos mínimos que os tijolos e blocos produzidos com a mistura solo-cimento devem atender (Tabela 4).

Tabela 4 - Características técnicas

Classificação		Observações
Tolerâncias dimensionais	Largura, altura e comprimento	±1mm
Resistência à compressão	Valores médios	≥ 2,0 MPa
	Valores individuais	≥ 1,7 MPa
Absorção de água	Bloco e tijolo	≤ 20% para valores médios
		≤ 22% para valores individuais

Fonte: NBR 8491 (ABNT, 2012b).

Segundo Oliveira et al. (2014), o tijolo de solo-cimento apresenta-se como uma alternativa na construção civil urbana ou rural por apresentar inúmeras vantagens em seu emprego na alvenaria e por permitir a incorporação de resíduos. Algumas pesquisas buscaram a incorporação de algum tipo de resíduo, como o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (ALBUQUERQUE et al., 2008), adição de grits (PINHEIRO et al., 2013), terra crua tratada com aditivos (FERREIRA; FREIRE, 2005), resíduos sólidos de tornearias mecânicas (OLIVEIRA; AMARAL; SCHNEIDER, 2014), coprodutos siderúrgicos (CASTRO et al., 2016), dentre outros. No que se refere a incorporação de resíduos em materiais cimentícios, destacam-se os resíduos de mineração e os resíduos lignocelulósicos.

3.5 Rejeito de mineração

O processo de mineração desenvolve importante papel no cenário econômico brasileiro, há diversos anos. O Brasil exportou em 2018 um volume de mais de 409 milhões de toneladas de bens minerais, desse total 68% corresponde ao minério de ferro (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2019). No cenário mundial, o país ocupa a segunda posição, ficando atrás apenas da Austrália. Embora haja jazidas do minério por todo o país, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019), os principais estados produtores deste minério são Minas Gerais e Pará, enquanto que os outros estados produzem aproximadamente 3% de toda a produção nacional.

No Brasil, o principal minério de ferro encontrado é a hematita e sua exploração gera diversos resíduos líquidos, sólidos e lama. No processo de exploração do ferro é necessário separar o “ferro” da sílica e entre as várias etapas de separação destaca-se a flotação, responsável pela geração de resíduos sólidos com característica arenosa e de baixa granulometria (PEREIRA JÚNIOR, 2011). Segundo Silva, Viana e Cavalcante (2017), os resíduos sólidos, principalmente arenosos, são obtidos em ordem de milhares de toneladas por dia, em uma mineradora de grande porte. Como exemplo, para cada 1 tonelada de minério obtido, são geradas 1,5 tonelada de resíduo arenoso, segundo o mesmo autor.

De acordo com Pereira Júnior (2011) a grande preocupação com esses resíduos está ligada ao armazenamento, além da ocupação de um espaço físico e da poluição atmosférica oriunda principalmente dos particulados provindos dos resíduos finos e ultrafinos. Para tentar resolver os problemas associados a esses tipos de resíduos, as mineradoras buscam diversos caminhos, tais como: uso de resíduos argilosos da mineração na fabricação de cerâmica e revestimentos, uso de resíduos sólidos como base para pavimentação e uso de resíduos sólidos

na construção civil, em substituição à areia e outros agregados (ALVES; BALDO, 1998; PEREIRA JÚNIOR, 2011; SILVEIRA, 2015).

Uma técnica utilizada para o confinamento do resíduo, bastante eficaz, é por meio da cimentação, que é um processo de solidificação. Pereira Júnior (2011) afirma que o método da cimentação consiste na mistura do resíduo sólido de mineração (principalmente que contém metais pesados) com o cimento. Ao unirem esses dois elementos, diversos cátions presentes no resíduo são convertidos em carbonatos e hidróxido insolúveis, além de ficarem acondicionados na estrutura cristalina da pasta de cimento, diminuindo assim os danos provocados ao meio ambiente pelo resíduo.

A grande evolução para o uso da cimentação é a aplicação do produto solidificado, desde que obtenha retenção máxima de contaminantes e que a liberação esteja inferior aos limites estabelecidos. Dessa forma, pretende-se produzir materiais cimentícios incorporando resíduo arenoso da exploração mineral, o qual passará a ser matéria-prima na fabricação destes materiais (TELLO; BAROSA, 2005).

3.6 Resíduos lignocelulósicos

Os resíduos lignocelulósicos possuem em sua constituição a lignina, celulose, hemicelulose e extrativos. Esses resíduos podem ser oriundos de culturas florestais, do processamento da madeira, além de resíduos de culturas agrícolas geradas durante seu beneficiamento. De acordo com Vale e Gentil (2008), a preocupação com a produção e o uso dos resíduos gerados não pode ser deixada de lado, uma vez que estes resíduos são descartados em forma de matéria orgânica ou queimados diretamente para a sua eliminação, o que acarreta num aumento considerável da poluição ambiental, além de representar perdas de matéria-prima e de possibilidade de agregação de valor.

As espécies de *Pinus* foram introduzidas no Brasil, principalmente, pelos Estados Unidos, embora inicialmente fossem cultivadas na Europa. Elas ocorrem naturalmente na América do Norte, na América Central, no norte da Europa e na Ásia (LIMA; JARÁ; ALFONSO, 1988). O *Pinus oocarpa* está presente em mais de 45% das florestas naturais da região de Chiapes no México, 50% das florestas da Guatemala, 66% das de Honduras e 90% das da Nicarágua e de El Salvador.

De acordo com Lima, Jará e Alfonso (1988), o gênero *Pinus* é composto por plantas lenhosas, com altura variando de 3 a 50 m. As plantas possuem tronco reto, mais ou menos cilíndrico e copa em forma de cone. Sua madeira apresenta massa específica que varia de 400

a 520kg/m³, a 15% de umidade. A cor da madeira do cerne varia do amarelo-claro ao alaranjado ou castanho-avermelhado.

Outra espécie madeireira cultivada no Brasil é o Eucalipto, apesar da grande diversidade de utilizações de sua madeira, os reflorestamentos com eucalipto têm sido destinados basicamente ao abastecimento das indústrias de celulose, carvão e de painéis (CARVALHO; SOARES; VALVERDE, 2005). Segundo a Indústria Brasileira de Árvores, são 5,5 milhões de hectares plantados com este gênero, com uma produtividade média de 39 m³/ha/ano. A produtividade, contudo, depende de diversos fatores, como o local de plantio, os tratamentos culturais e os insumos disponibilizados (EMBRAPA, 2017).

Com o crescimento do mercado, aumenta a quantidade de resíduos madeireiros que muitas vezes não têm utilização na indústria em que foram gerados (BRAND et al., 2002). Segundo Villas Boas et al. (2017), a geração de resíduos está em torno de 30% a 60% de toda a árvore, dependendo da empresa.

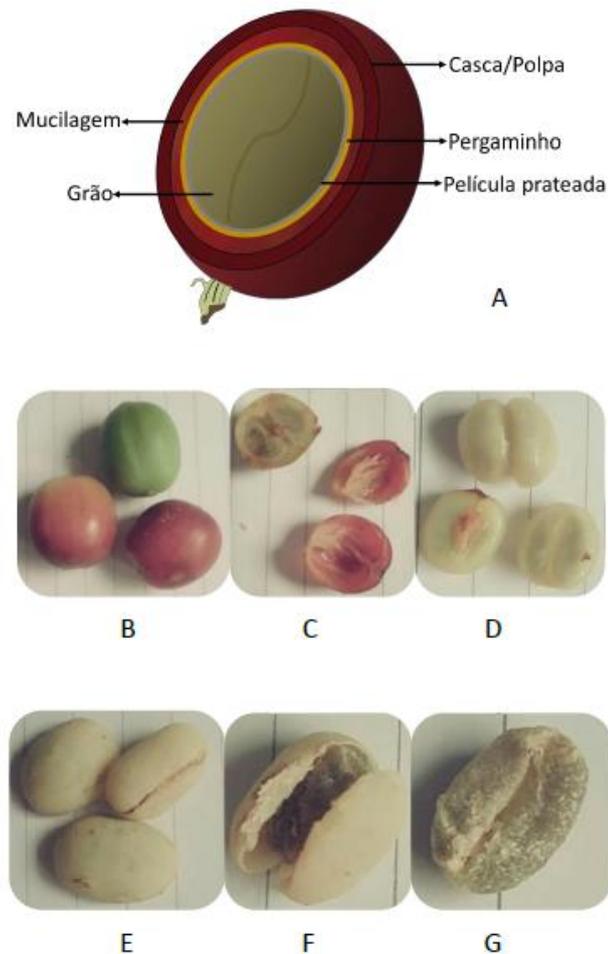
Atualmente, alguns pesquisadores têm se referido à utilização de resíduos para diversos produtos, tais como: painéis de madeira aglomerada, compósitos de plástico-madeira e compósitos de madeira-cimento (IWAKIRI et al., 2000; LIMA; IWAKIRI, 2012; PARCHEN, 2012; YAMAJI, 2004). Entretanto, a utilização desses resíduos para a produção de tijolos solo-cimento ainda é escassa.

O café foi introduzido no Brasil aproximadamente 298 anos e está consolidado como um dos principais produtos do agronegócio brasileiro, sendo responsável pela geração de mais de 8 milhões de empregos em toda sua cadeia produtiva, que se inicia com a produção de grãos, indústrias de torrefação e moagem, e finaliza nas indústrias produtoras de café (MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA, 2016).

O produto é extremamente importante para a economia nacional, é responsável pela produção de cerca de 30 milhões de sacas de 60 quilos, além de contribuir com aproximadamente 30% do mercado internacional (SINDICATO DO COMÉRCIO DE CAFÉ EM GERAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - SINDCAFE-SP, 2019). O Brasil é o maior produtor de café no mundo, possuindo um parque cafeeiro (café arábica e conilon) de 2,2 milhões de hectares, distribuídos em 15 estados, sendo Minas Gerais responsável por aproximadamente 52% da produção nacional. A produção total de café no Brasil para o ano de 2019 foi de 49,31 milhões de sacas de café beneficiado, sendo que as espécies Arábica e Conilon podem apresentar valores de produção da ordem de 34,3 milhões e 15,01 milhões de sacas, respectivamente (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019).

Os frutos do café são formados pelo exocarpo (pele/casca), mesocarpo (polpa/mucilagem), endocarpo (pergaminho) e endosperma (grão) (Figura 1).

Figura 1 - Fruto do café. (A) Fruto do café e suas partes. Fotos dos frutos de cafés em: (B) diferentes estágios de maturação, (C) corte transversal do fruto com a casca removida, (D) grão com mucilagem, (E, F) grãos após secagem com o pergaminho e (G) grão cru com a película prateada.



Fonte: Durán et al. (2017).

Segundo Barcelos e Gonçalves (2011), a diferença entre a casca e a polpa de café, é a presença ou não do endocarpo ou pergaminho. Teixeira (1999) relata que cerca de 28 a 39% da casca é composta pelo pergaminho (componente fibroso). De acordo com Comério et al. (2016), durante o processamento do café em côco, gera-se cerca de 50% de casca, o que equivale a cerca de 1,5 milhões de toneladas levando em consideração a produção de 51 milhões de sacas de 60 quilos no ano de 2016. Dessa forma, torna-se necessário buscar soluções viáveis para o seu reaproveitamento.

A história e o desenvolvimento do Brasil estão diretamente ligados ao cultivo da cana-de-açúcar, bem como a produção de seus derivados. Primeiramente transformada em açúcar, a

cana-de-açúcar ocupa um importante papel na economia, surgindo o Brasil como líder mundial na produção de açúcar e álcool.

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma gramínea perene, de origem Asiática e muito bem adaptada na maioria dos climas tropicais e subtropicais. O Brasil lidera o ranking de maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, seguido pela China, Índia, Tailândia e Austrália. A produção de cana-de-açúcar no Brasil na safra 2019/2020 foi de aproximadamente 642 milhões de toneladas distribuídas em 8,48 milhões de hectares de terra, resultando em uma produtividade média de 75,78 t/ha (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019b).

A cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são gerados aproximadamente 280kg de resíduos, dessa forma, é estimado a geração de 175 milhões de toneladas de resíduo no beneficiamento da safra 2019/2020. Vários são os resíduos provenientes da unidade sucroalcooleira, sendo o bagaço um dos mais atrativos pelo seu poder calorífico. Anualmente, são gerados em torno de 80 milhões de toneladas de bagaço. Uma grande fração deste bagaço é queimada dentro das usinas de açúcar e etanol para produzir vapor e energia. A outra fração restante pode ser utilizada para produção de polpas celulósicas especiais e para outras aplicações (ANDRADE, 2014).

Segundo o Grupo de Países Latinoamericanos y Del Caribe (1990), o bagaço de cana é um resíduo lignocelulósico fibroso oriundo do colmo da cana-de-açúcar, produzido após moagem e extração do caldo, formado por um conjunto heterogêneo de partículas de tamanho variando entre 1,00 e 25,0 mm. Em comparação com outros resíduos agroindustriais, pode-se afirmar que o bagaço reúne uma série de condições, o que faz com que ele seja o material fibroso com mais possibilidades de aplicações (MENDES et al., 2010).

Aggarwal (1995) afirmou que o bagaço de cana-de-açúcar pode ser usado para a produção de materiais compósitos com cimento, e que estes apresentam alta e uniforme performance na absorção de umidade e nos ciclos alternados de secagem e umedecimento, sendo, portanto, recomendados para uso em construção civil.

3.7 Compósitos cimentícios com resíduos lignocelulósicos

Os compósitos obtidos a partir de matriz cimentícia, reforçados com resíduos vegetais, podem ser utilizados para diversas finalidades, em vista de suas características específicas, tais como, baixa massa específica e condutividade térmica, resistência ao fogo, impermeabilidade e resistência mecânica. As utilizações mais convencionais desses compósitos são na fabricação

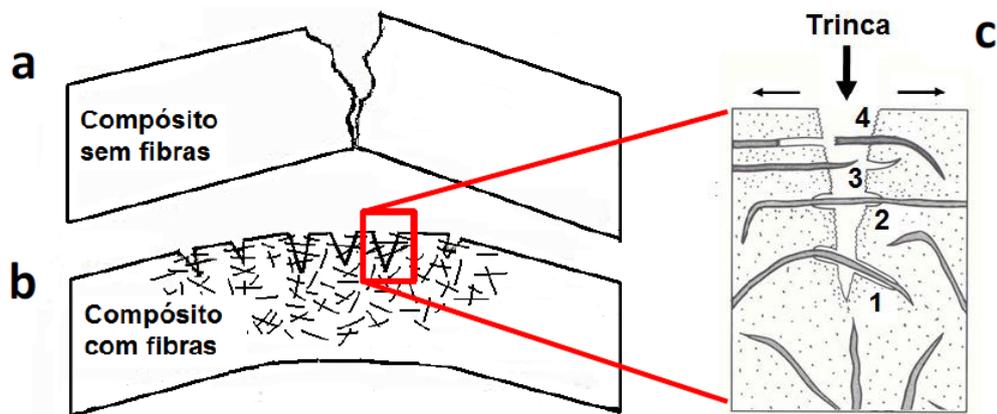
de painéis, revestimentos, forros, vedação de equipamentos industriais, pisos e blocos não estruturais (PIMENTEL, 2000).

Silva e Akasaki (2002) estudaram a compactação em misturas solo-cimento com resíduos vegetais (casca de arroz, pó de serra – Eucalipto, bagaço de cana) e concluíram que a determinação da quantidade de resíduo a ser utilizada foi influenciada pelos ensaios de compactação, uma vez que ocorreu a redução da massa específica aparente seca máxima com o aumento da quantidade de resíduos. A alteração das propriedades físico-mecânicas dos solos reforçados com fibras depende de algumas características das fibras como: resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimento, rugosidade e composição química (SPECHT et al., 2002).

Pelo fato do Brasil ser um país agroindustrial, a ideia da inserção de resíduos vegetais em matrizes frágeis, parte da quantidade de resíduo disponível e da obtenção de produtos de baixo custo, alto desempenho e elevada durabilidade. As fibras lignocelulósicas apresentam potencial para uso como elemento de reforço em compósitos, podendo destacar as de madeira, juta, sisal (TOLEDO FILHO; SANJUAN, 1999), coco, bambu e bananeira (SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS 2003). Aziz, Paramasivam e Lee (1986) chamaram atenção para quatro pontos importantes na produção de compósitos com partículas vegetais, sendo eles: preparação da partícula, mistura dos ingredientes, moldagem e cura. Segundo estes autores, o comportamento de todos os compósitos com fibra natural é muito influenciado pelo processo de produção, controle de qualidade e a maneira como o material é moldado.

Uma das vantagens da utilização da fibra vegetal em matrizes à base de cimento, está relacionada ao fato de que essas matrizes são frágeis e sob a ação de esforços de tração ou deformações por alongamento, tendem à formação de fissuras. A adição de fibras reduz a fissuração na matriz, tendo em vista que as fissuras são interligadas e, como resultado, ocorre um aumento na tenacidade e na resistência à tração e ao impacto (Figura 2). Alguns autores afirmam que a inserção de fibras vegetais na matriz cimentícia, reduzem a massa específica, retração plástica, condutividade térmica e melhora o desempenho acústico do produto final (SOROUSHIAH; WON; HASSAN, 2012; TEIXEIRA et al., 2012; TONOLI et al., 2013a).

Figura 2 - Representação esquemática de um compósito de cimento sujeito ao esforço de flexão. a) compósito sem fibra ou partículas; b) compósito com fibras ou partículas; c) Caminhamento da trinca: 1-Descolamento; 2-Interceptação; 3- Arrancamento; 4-Fratura da fibra ou partícula.



Fonte: Coutts (2005).

A incompatibilidade química entre o resíduo lignocelulósico e o cimento é a principal desvantagem na fabricação desses compósitos. Pimentel (2000), afirma que a constituição química do resíduo lignocelulósico, com a presença de açúcares, resinas, fenóis e amido, pode afetar de forma adversa a hidratação do cimento. Alguns dos agentes causadores da dificuldade de ligação entre o reforço e a matriz cimentícia, estão ligados à interferência dos açúcares com estrutura molecular e cristalina. Portanto, a compatibilidade entre a matriz (cimento) e o reforço (resíduos lignocelulósicos) depende dos açúcares que compõem a hemicelulose, como a pentose, a hexose, os ácidos hexurônicos e as deoxiexoses, por serem solúveis em água e em soluções alcalinas, podendo se solubilizar com maior facilidade (LATORRACA; IWAKIRI, 2005).

Agopyan et al. (2005) afirmam que a redução da vida útil dos compósitos contendo fibras vegetais, está diretamente ligado à degradação da lignina por meio dos álcalis presentes na água do cimento, reduzindo assim as ligações na interface fibra/matriz. Entretanto, alguns estudos relatam que a presença da lignina nas fibras, aumenta a estabilidade dimensional e reduz o caráter hidrofóbico da mesma, melhorando a ligação fibra/matriz e diminuindo a

mineralização das fibras (MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2006; NANKO; ASANO; OHSAWA, 1991).

O processo de mineralização das fibras é ocasionado pelo acúmulo dos álcalis no interior da célula (lúmen), promovendo uma diminuição da flexibilidade das fibras. Dessa forma, a tenacidade do compósito tende a ser reduzida (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005; TOLÊDO FILHO et al., 2000).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 1980. 115 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.
- AGGARWAL, L. K. Bagasse - Reinforced Cement Composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 17, n. 2, p. 107-112, 1995.
- AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 527-536, May 2005.
- ALBUQUERQUE, L. Q. C. et al. Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (Kollar, 1832). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 553-560, mar./abr. 2008.
- ALGIN, H. M.; TURGUT, P. Cotton and limestone powder wastes as brick material. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 22, n. 6, p. 1074-1080, June 2008.
- ALVES, W. A.; BALDO, J. B. O potencial da utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico – parte II. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 2, n. 5/8, p. 38-40, 1998.
- ANDRADE, M. F. **Caracterização e utilização do bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante para produção de polpa solúvel e papel de impressão e escrita**. 2014. 114 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP, 2000. 16 p.
- _____. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP, 1985. 4 p.
- _____. **A versatilidade do cimento brasileiro**. São Paulo: ABCP, 2004. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/tipos/>>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10833: fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 3 p.
- _____. **NBR 8491: tijolo de solo-cimento: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b. 5 p.
- AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S. L. Natural fibre reinforced concretes in housing construction. **Housing Science**, Coral Gables, v. 10, n. 4, p. 267-278, 1986.
- BARCELOS, A. F.; GONCALVES, C. C. M. Aproveitamento da casca de café na alimentação animal. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L.; CARVALHO, G. R. **Café Arábica: da pós-colheita ao consumo**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. v. 2, p. 97-168.

BRAND, M. A. et al. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Floresta**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 247-259, 2002.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

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

CARVALHO, R. M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 105-118, 2005.

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

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

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 381-412.

COMÉRIO, L. et al. Casca do café para a geração de energia: caracterização da biomassa e análise dos gases de combustão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABEC, 2016. p. 1-8.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Observatório Agrícola. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café - Quarto levantamento**, Brasília, v. 5, n. 4, p. 1-44, dez. 2019a.

_____. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana de Açúcar - Terceiro levantamento**, Brasília, v. 6, n. 3, p. 1-58, dez. 2019b.

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fibre cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 518-526, May 2005.

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

DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONÔMICOS (DEPEC). **Minério de Ferro**. São Paulo: DEPEC, 2017. 48 p.

DURÁN, C. A. A. et al. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. **Revista Virtual de Química**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 107-134, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2006. 306 p.

_____. **Sistema de produção de pinus**. Colombo: Embrapa, 1983. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-produtos-processos-e-servicos/-/produto-servico/2090/sistema-de-producao-de-pinus>>. Acessado em: 9 jul. 2017.

_____. **Sobre o eucalipto**. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/tema>>. Acesso em: 9 jul. 2017.

FARIA, J. R. G. **Unidade de produção de tijolos de solo estabilizado**. 1990. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990. 180 p.

FERRAZ, A. L. N. **Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento**. 2004. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

FERREIRA, R. C.; FREIRE, W. J. Desempenho físico-mecânico de minipainéis de terra crua tratada com aditivos químicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 585-597, set./dez. 2005.

GRUPO DE PAÍSES LATINOAMERICANOS Y DEL CARIBE. **Manual de los derivados de la caña de azucar**. Caribe: Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe, 1990. 447 p.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 171-180, Feb. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Relatório Anual de atividades: julho 2018 a junho 2019**. Belo Horizonte: IBRAM, 2019. 49 p.

IWAKIRI, S. et al. Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 1, n. 1/2, p. 23-28, 2000.

KHEDARI, J.; WATSANASATHAPORN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 1, p. 111–116, Jan. 2005.

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Painéis de madeira-cimento. In: IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. p. 213-239.

LIMA, A. F.; JARÁ, E. R. P.; ALFONSO, V. A. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. In: PHILIPP, P.; D’ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. p. 129-167.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de madeira de Pinus spp, cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 639-650, 2012.

LIMA, P. R. et al. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 644-651, nov./dez. 2007.

- LOPES, F. F. et al. Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 316-321, mar. 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 574 p.
- MENDES, R. F. et al. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, jun. 2010.
- MILANI, A. P. S.; BARBOZA, C. S. Contribuição ao estudo de propriedades do solo-cimento auto-adensável para fabricação de paredes monolíticas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 143-153, out./dez. 2016.
- MILANI, A. P. 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, jan./abr. 2006.
- MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Agricultura**. Brasília: MAPA, 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>>. Acesso em: 15 set. 2016.
- MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber–cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 36, n. 7, p. 1240-1251, July 2006.
- MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 4, p. 435-448, Apr. 2005.
- NANKO, H.; ASANO, S.; OHSAWA, J. Shrinkage behavior of pulp fibers during drying. In: TAPPI INTERNATIONAL PAPER PHYSICS CONFERENCE, 1., 1991, Kona. **Proceedings...** Kona: Tappi Press, 1991. p. 365-374.
- OLIVEIRA, J. R.; AMARAL, A. G.; SCHNEIDER, R. M. Incorporação de resíduos sólidos de torneiras mecânicas na fabricação de tijolos solo-cimento. **Nativa**, Sinop, v. 2, n. 1, p. 53-57, jan./mar. 2014.
- OTI, J. E.; KINUTHIA, J. M. Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 58, p. 52–59, Apr. 2012.
- PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com método de compactação vibro dinâmica**. 2012. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- PEREIRA JÚNIOR, S. S. **Desenvolvimento de argamassas contendo resíduos arenosos de mineração e estudos de suas propriedades visando sua utilização**. 2011. 145 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

PIMENTEL, L. L. **Telhas onduladas à base de cimento Portland e resíduos de *Pinus caribaea***. 2000. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PINHEIRO, M. L. et al. Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de grãos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 29-46, 2013.
SANTIAGO, C. C. **O solo como material de construção**. 2 ed. rev. Salvador: EDUFBA, 2001. 72 p.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 25, n. 6, p. 585-592, Aug. 2003.

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

SEKHAR, D. C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 166, p. 531–536, 2018.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**: relatório de pesquisa. Brasília: IPEA, 2012. 40 p.

SILVA, A. P.; AKASAKI, J. L. Influência dos resíduos agroindustriais na produção de tijolo de solo-cal. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: UNB, 2002.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Resíduos Sólidos da atividade de mineração**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.cidade.ssustentaveis.org.br/sites/default/files/arquivos/11_residuos_solidos_da_mineracao.pdf>. 2011.

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

SILVEIRA, M. D. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015. 39 p. Monografia (Graduação em Engenharia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SINDICATO DO COMÉRCIO DE CAFÉ EM GERAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDCAFE-SP). **Quem somos**. São Paulo: SINDCAFE, 2019. Disponível em: <<http://www.sindicafes.com.br/>>. Acesso em: 30 set. 2019.

SOROUSHIAN, P.; WON, J. P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 34, p. 44-53, Sept. 2012.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento**. 2006. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006.

SOUZA, M. I. B. et al. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 205-212, dez. 2008.

SPECHT, L. P. et al. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 15-34, jan./abr. 2002.

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

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 Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

TEIXEIRA, R. S. **Utilização de resíduos sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TEIXEIRA, R.S. et al. Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. **Key Engineering Materials**, Aedermannsdorf, v. 517, p. 450-457, 2012.

TELLO, C. C. O.; BAROSA, L. M. V. Cimentação: opção para tratamento e remediação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E CICLO DE CONFERÊNCIAS SOBRE POLÍTICA E GESTÃO AMBIENTAL, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ICTR, 2005. p. 4718-4727.

TOLÊDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 22, n. 2, p. 127-143, Apr. 2000.

TOLEDO FILHO, R.; SANJUAN, M. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 29, n. 10, p. 1597-1604, Oct. 1999.

TONOLI, G. H. D. et al. Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 37, p. 68-75, Mar. 2013a.

_____. Isocyanate-treated cellulose pulp and its effect on the alkali resistance and performance of fiber cement composites. **Holzforschung**, Berlin, v. 67, n. 8, p. 853-861, Dec. 2013b.

TONOLI, G. H. D. **Fibras curtas de Eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento.** 2009. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III.** Rio Branco: Suprema, 2008. p. 195-241.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** São Paulo: EDUSP, 1973. 220 p.

VILLAS BOAS, B. T. et al. Avaliação dos efeitos de diferentes dosagens de água/cal na resistência à compressão axial de compósitos de madeira-cimento. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1-10, 2017.

WALKER, P. J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 17, n. 4, p. 301-310, 1995.

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira.** 2004. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

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, Mar. 2016.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 - Properties of soil-cement bricks produced with mining waste

PROPERTIES OF SOIL-CEMENT BRICKS PRODUCED WITH MINING WASTE

Manuscript submitted to Construction and Building Materials (2019).

Abstract: Construction using the soil as raw material is the most economically efficient way to address housing problems with the lowest demand for resources. Soil-cement brick, also known as "ecological brick", is a composite obtained by mixing soil, cement and water at previously established ratios that has good compressive strength, good durability and low volumetric shrinkage. This brick is an excellent alternative in urban or rural civil construction because it offers several advantages for use in masonry and allows the incorporation of waste. Regarding the incorporation of waste in cementitious materials, mining waste stands out. This waste is generated in the order of thousands of tons per day in one large mining company alone, leading to air pollution and the occupation of large physical spaces by mining companies. Thus, the aim of this work was to evaluate the effect of the substitution of different percentages (0, 10, 20, 30 and 40%) of soil from this mining waste on the properties of soil-cement bricks. The raw materials used were soil (classification A-4), CPV-ARI cement and solid mining waste, which underwent a physical-chemical characterization. The mixture used for the production of the bricks was 1:9 (cement:soil), where the soil was replaced by different percentages of waste. The following technological properties were determined: dry density, water absorption, mass loss by immersion, compressive strength, thermal conductivity and microstructure. The experimental results indicated that the addition of the mining waste positively influenced the densification behaviour of the soil-cement bricks. In addition, the waste can be incorporated into the brick at a ratio of up to 40% considering the current characterization standards.

Key words: ecological brick, sustainability, physical-mechanical properties, thermal comfort.

1 INTRODUCTION

Civil construction projects are constantly seeking new concepts and solutions towards achieving sustainability throughout their production process to reduce the use of natural resources and, consequently, reduce environmental impacts.

One of the oldest and most widely used construction techniques is the construction of masonry systems using the soil as the main raw material. The lack of resources and increasingly high material costs in these systems have led engineers to seek new alternatives in the production of conventional building materials [29, 30, 37-38]. This innovation can be achieved by using and manufacturing durable, low-cost products, especially from locally available resources. In this context, the sector of civil construction materials and elements was the one that developed the most and more comprehensively applied the concepts of sustainability.

A material that has been gaining prominence in terms of sustainability is the soil-cement brick (ecological brick), as it precludes the need for the burning process during its manufacture. This material is made from the compression of a homogeneous mixture of soil, water and a stabilizing material (Portland cement) that confers high strength and durability to the product.

The incorporation of waste in construction materials has been addressed in several studies aimed at the partial or total replacement of well-established products such as sand, Portland cement and even soil [23, 30, 37-43]. Although barely explored in this context, the solid waste resulting from the mining process, which generates 1.5 tons of waste for each ton of iron ore obtained, has great potential for applications involving cementitious matrices [1-25].

The main concern with this waste is directly related to its storage, which is costly and requires a large physical space, and the air pollution originating mainly from the fine and ultrafine waste particulates. In the particular case of mining, waste is deposited in tailings dams, and the amount of waste produced will vary according to the efficiency of the processing and the type and content of the mined ore.

According to Da Silva et al. [26], although inert, mining waste has chemical compositions and particle size distributions very different from the original soil, which requires adequate disposal in order to reduce its environmental impact considering the great growth potential of this waste. Some studies have suggested the use of this material as a raw material for the manufacture of construction materials [2-26].

Taking into account the application of soil-cement bricks, several studies have attempted to evaluate and understand the physical-mechanical behaviour of these materials when used in civil construction. According to Balaji et al. [18], although there are few studies

relating the characteristics of the raw material and the thermal properties of soil-cement bricks, this relationship is highly relevant for the applicability of the product.

Thus, the aim of the present study was to evaluate the effect of the substitution of soil by different percentages of solid mining waste on the physical-mechanical properties and thermal insulation of soil-cement bricks.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

2.1.1 Mining Waste

Mining waste from Samarco S/A, collected at the Fundão Dam located in the city of Mariana, state of Minas Gerais (MG), Brazil, was used for the production of the soil-cement bricks. The waste was characterized for its chemical and mineralogical composition in the Samarco Chemical Laboratory. The Al_2O_3 and Fe contents were determined using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP- OES). The iron contents were determined by dichromatometry, and the SiO_2 contents were determined by difference. In addition to these parameters, the physicochemical properties of the waste were evaluated from an analysis performed at the Department of Soil Science of the Federal University of Lavras (UFLA). The Ca ($\text{cmol}\cdot\text{dm}^{-3}$), Al ($\text{cmol}\cdot\text{dm}^{-3}$) and Fe ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) levels and pH were determined, and the material was analysed for clay, silt and sand. Table 1 shows the chemical composition and the physical-chemical properties of the mining waste.

Table 1

Chemical composition and physical-chemical properties of the mining waste.

Chemical composition	Content (%)
Fe	13.63
SiO_2	79.60
P	0.011
Al_2O_3	0.20
LOI	0.43
Properties	Values
pH	6.80
Clay	52.00 ($\text{dag}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Silt	16.00 ($\text{dag}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Sand	32.00 ($\text{dag}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Classification of material	Type 3 - Clayey texture

Fe = Iron; SiO_2 = Silicon dioxide; P = Phosphorus; Al_2O_3 = Aluminium oxide; LOI = loss on ignition, mass of moisture and volatile material (water and carbon dioxide).

The particle size distribution was analysed at the Laboratory of Construction Materials of the Lavras University Centre (UNILAVRAS) following the NBR 7181 [9]. Based on the

particle size distribution analysis of the waste, it was observed that it has a fineness modulus of 4.78 mm and a maximum characteristic particle size of 0.25 mm, which characterizes the mining waste as very fine material.

The specific mass of the waste, determined using a Chapman flask, was 2.703 g.cm^{-3} , while the specific surface area, determined by the Blaine method, was $1932 \pm 58 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$.

The pozzolanicity of the mining waste was determined according to the NBR 5752 [6].

2.1.2 Soil and Cement

Soil was collected on the campus of UFLA at a depth of 40-80 cm from the soil surface and was crushed and sieved to remove undesirable materials. The particle size composition of the soil was determined according to the NBR 7181 [9]. Following the NBR 10833 [13], certain specific conditions are necessary for the production of soil-cement bricks, namely: 100% of the soil passing through a 4.75 mm sieve (n°4) and 10% to 50% passing through the 75 μm sieve (n°200). For the collected soil, 100% of soil passed through the n°4 sieve and 38% passed through the n°200 sieve, thus making it suitable for the production of soil-cement bricks. Next, the collected soil was classified and exhibited a low percentage of sand, at approximately 36%, thus requiring the soil to be corrected to make it sandy. After correction, the soil exhibited an ideal sand percentage of 56%, making it a sandy soil suitable for the production of the composites.

To determine the consistency limits, the procedures described by the NBR 6459 [7] and NBR 7180 [8] standards were followed. Table 2 presents the soil classification according to the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) and the Atterberg limits.

Table 2
Soil classification.

Properties	Values (%)
Liquid Limit (LL)	30.63
Plastic Limit (PL)	20.73
Plasticity Index (IP)	9.90
Percentage of soil passing through the 75 μm sieve	38.00
Group Index (GI)	0.60
AASHTO Classification	A-4

NBR 10833 [13] establishes that the liquid limit is equal to or less than 45% and that the plasticity index should not exceed 18%, and the values found were in accordance with this

standard. The soil was classified as A-4 according to the AASHTO guidelines, with the ABCP [5] recommending 10% cement content for the production of soil-cement bricks.

To analyse the soil composition for the presence of swelling clays that tend to compromise the performance of the material due to drying shrinkage, the procedures described by the CEPED (Center for Research and Development) [22] for determining of soil shrinkage were followed. To perform the test, the soil sample was moistened until obtaining a material of plastic consistency and then placed into a 60.0 cm long, 8.5 cm wide, 3.5 cm thick box. After manual compaction, the material was left to rest in the shade for seven days; subsequently, the shrinkage along the length of the box was measured, and the sum of the readings should be less than 20 mm and the sample should not, after seven days, have any transverse cracks in the central part. The soil shrinkage value found was 8.64 mm; given that the maximum value allowed by the CEPED [22] is 20 mm, the soil can be used for the production of soil-cement bricks.

To assess changes in the optimum moisture content and the dry density, according to the partial replacement of the soil by mining waste, compaction tests were carried out for the treatments with different percentages of waste. The optimum moisture content and dry density were obtained using the (normal Proctor) compaction test carried out in accordance with the NBR 7182 [10] and NBR 12023 [14] standards.

CPV-ARI cement (high-early strength Portland cement) was used because it offers satisfactory properties for the production of soil-cement bricks, has high early strength and provides for the rapid deformation of the bricks.

2.2 Methods

2.2.1 Experimental procedure and production of bricks

The experimental design for the production of soil-cement bricks consists of replacing the soil content with increasing percentages of mining waste (0, 10, 20, 30 and 40%). The percentage of Portland cement in the mixture (10%) was in accordance with the classification of the soil as A-4.

To make the bricks, the constituents of each formulation were dried, weighed and mixed in a planetary mixer in order to obtain a homogeneous mixture. Subsequently, water was added and a new homogenization was carried out, and this mixture was transferred to a press in order to acquire the shape of solid bricks. The amount of water for each formulation was determined by the normal Proctor test. The equipment used for the shaping of the bricks was a hydraulic

press with a 7.5 cv motor manufactured by Verde Equipamentos. The bricks produced measured $25.0 \times 12.5 \times 5.0$ cm (length, width and thickness) according to the NBR 8491 [11] (Fig. 1).

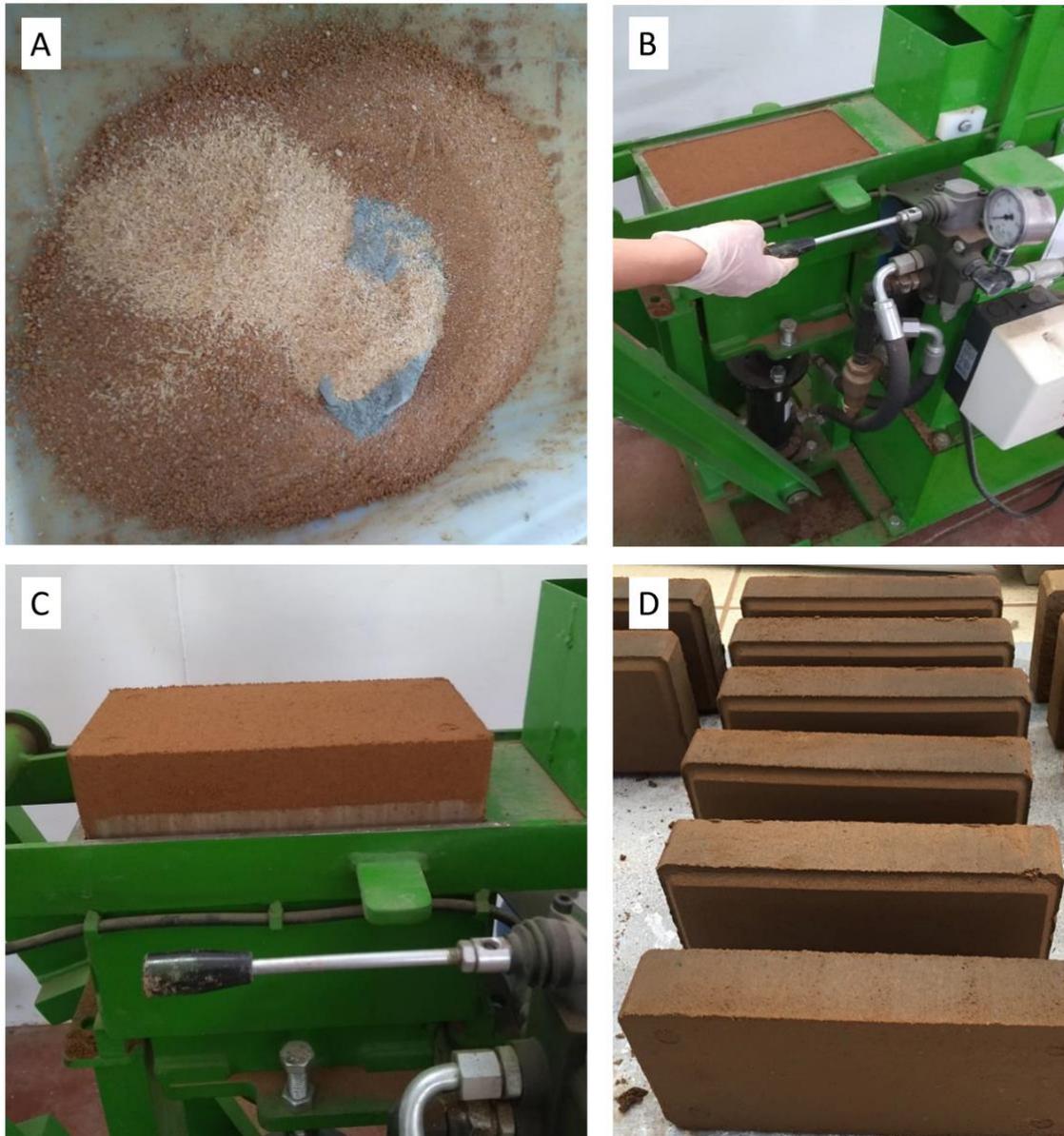


Fig. 1. Production of soil-cement bricks. (A) homogenization of the blend; (B) compaction and shaping of the brick; (C) deformation and (D) soil-cement brick

With the dry density data, it was possible to determine the degree of compaction of the bricks for the different treatments. The degree of compaction (DC) corresponds to the ratio between the dry density (γ_d) of the brick and the maximum dry density (γ_{dmax}) obtained in the normal Proctor compaction test.

The brick curing process was performed at a temperature of 20 ± 2 °C and 95% moisture for 28 days, as determined by NBR 10833 [13]. After this period, the physical, mechanical, thermal and microstructural properties of the bricks were characterized.

2.2.2 Ageing of bricks

The ageing of the bricks was performed based on the accelerated ageing method, according to the procedures described by NBR 13554 [16], which classifies the durability of soil-cement brick by wetting and drying. The bricks were subjected to six wetting and drying cycles, from which the water absorption, density, compressive strength and mass loss were determined. Each cycle was composed by immersion in water for 5 hours and subsequent drying at 71 ± 2 °C for 42h.

2.2.3 X-ray diffraction (XRD)

The X-ray diffraction technique was used to observe the main crystalline phases of each raw material used in the production of the bricks. The crystalline structures of the materials were analysed in the Embrapa Instrumentação laboratory - São Carlos, state of São Paulo (SP), by assessing diffraction patterns obtained in a XRD-6000 Shimadzu X-ray diffractometer (Shimadzu, Kyoto, Japan). The samples were analysed in a range of 5° to 45° using a scan rate of $1^\circ \cdot \text{m}^{-1}$.

2.2.4 Determination of the physical, mechanical and microstructural properties of bricks

The soil-cement bricks were characterized after the 28-days cure period and after accelerated ageing. The physical and mechanical properties evaluated are presented in Table 3.

Table 3
Evaluated tests and applied methodologies

Tests	Methodology
Dry density	[12]
Water absorption	[12]
Mass loss by immersion	ME-61 (ME, 2007)
Compressive strength	[12]
Thermal Conductivity	[28]

After the physical and mechanical tests, scanning electron microscopy (SEM) analysis was performed at the Department of Phytopathology of UFLA. A ZEISS DMS 940 microscope was used. This characterization was performed at the fracture surface of the bricks, which were tested by compression in order to evaluate the effect of the addition of the mining waste to the matrix on the mechanical and physical properties. The analyses were performed on bricks before and after accelerated ageing.

The analysis of the results was performed by descriptive and experimental statistics. The experiments were evaluated in a completely randomized design. The results obtained for dry

density, water absorption, mass loss by immersion, compressive strength and thermal conductivity were analysed by analysis of variance, and when significant, regression analysis was performed at a 5% significance level using SISVAR software 5.6.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Pozzolanic activity index of the mining waste

Fig. 2 shows the results for compressive strength obtained by the pozzolanicity test of the mining waste. The results indicate that the pozzolanic activity index of the mortar containing waste and cement was approximately 83.33%. The NBR 12653 [15] standard stipulates a minimum value of 75% for the pozzolanic activity index using Portland cement. Thus, it is considered that the mining waste obtained a good mechanical performance and can be considered a pozzolanic material.

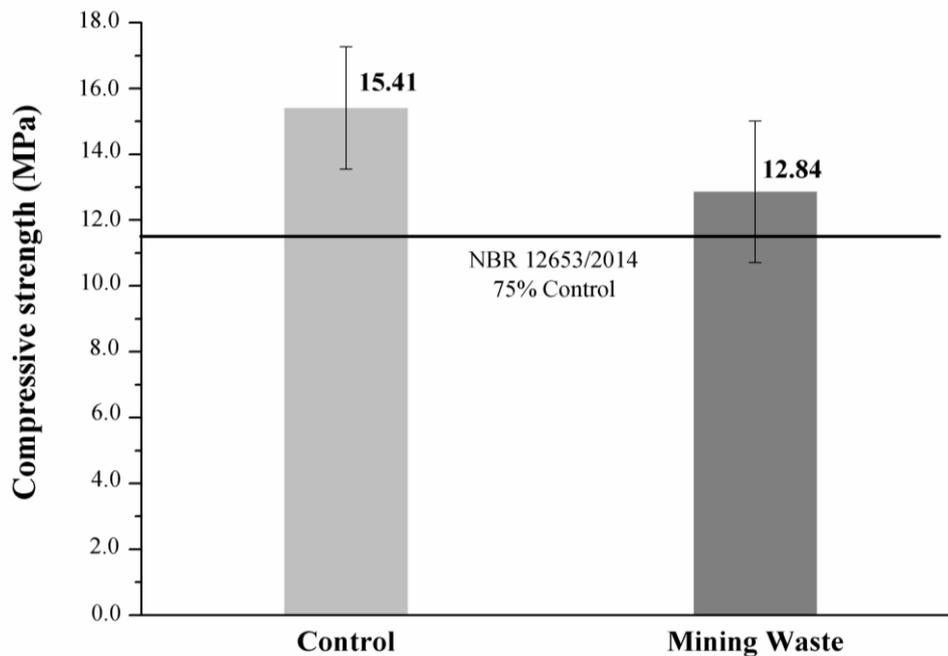


Fig. 2. Compressive strength in the pozzolanicity test.

According to Villamizar et al. [43], the SiO_2 content combined with the Al_2O_3 and Fe_2O_3 contents is often used to provide an indication of the pozzolanic nature of the material analysed due to its ability to react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and alkali to form C-S-H phases. Thus, the high percentage of SiO_2 (Table 1) in the mining waste makes it suitable for the production of soil-cement bricks with higher strength values.

3.2 Compaction characteristics

Fig. 3 shows the compaction curves, while Table 4 shows the equation of each curve and the values of optimal moisture (W_{ot}) and maximum dry density (γ_{dmax}).

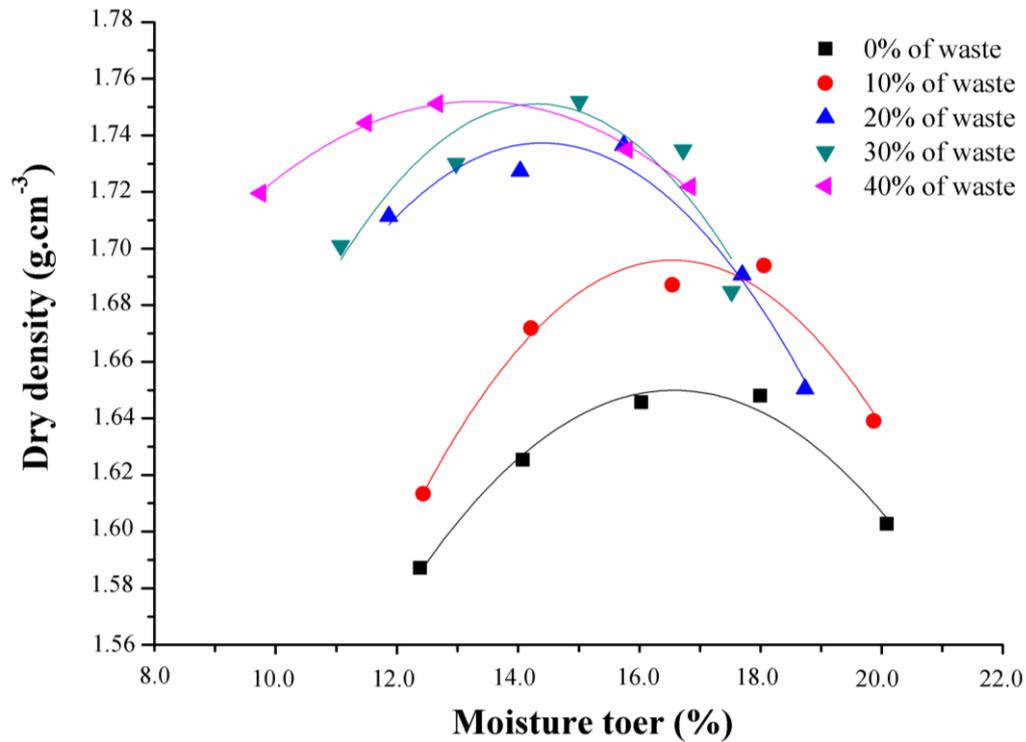


Fig. 3. Compaction curves for each treatment.

Table 4

Mean optimum moisture content and maximum dry density.

Treatment	Curve equation	Optimal moisture W_{ot} (%)	Maximum dry density γ_{dmax} (g.cm ⁻³)
0% waste	$\gamma_d = -0.0037x^2 + 0.1214x + 0.6439$ $R^2 = 0.9822$	16.58	1.65
10% waste	$\gamma_d = -0.0045x^2 + 0.1477x + 0.4668$ $R^2 = 0.9041$	16.56	1.69
20% waste	$\gamma_d = -0.0045x^2 + 0.1293x + 0.8057$ $R^2 = 0.9659$	14.43	1.74
30% waste	$\gamma_d = -0.0053x^2 + 0.1511x + 0.6703$ $R^2 = 0.8215$	14.33	1.75
40% waste	$\gamma_d = -0.0025x^2 + 0.0669x + 1.3065$ $R^2 = 0.9944$	13.33	1.75

The results in Table 4 reveal an increase in the maximum dry density (γ_{dmax}) and a reduction in the optimal moisture values (W_{ot}) as the mining waste content increases in the composition of the mixture, where the lowest moisture content and consequently highest γ_{dmax} were observed for the treatment containing 40% waste. The soil-cement without addition of

waste, for example, exhibited an optimal moisture content of 16.58%. With 40% of waste in the mixture, the optimal moisture content reduced to 13.33%, that is, there was a loss of approximately 19.60% in the optimal moisture content.

This result can be justified by the fact that the mining waste has a high density (2.703 g.cm^{-3}) as a result of the geometry of the material and its high pozzolanic activity (Fig. 2), thus facilitating the compaction process of the mixture. This leads to more compact and stronger soil-cement bricks with less water absorption and, consequently, more durability [31-40].

3.3 Physical characterization of bricks

3.3.1 Dry density, moisture content and degree of compaction

The dry density of soil-cement bricks produced with different percentages of mining waste, at 28 days of curing and after ageing, are presented in Fig. 4.

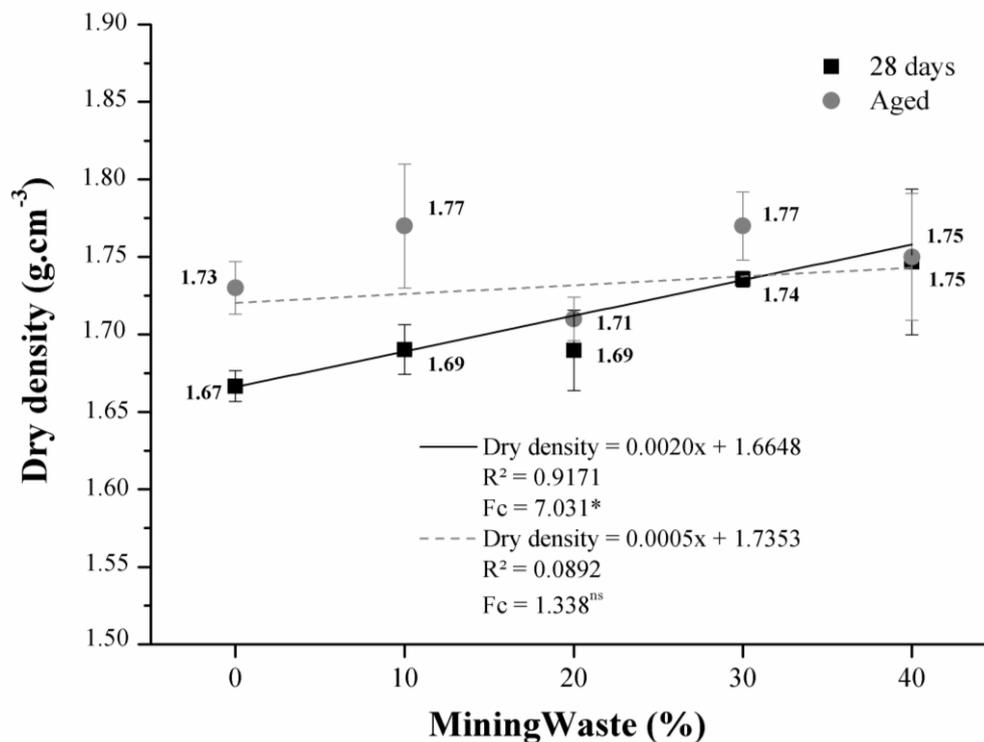


Fig. 4. Dry density of soil-cement bricks at 28 days of curing and after ageing. * Significant *P* value at 5% significance level. ^{ns} Non-significant *P* value at 5% significance level.

The results showed a significant effect of the percentage of mining waste on the dry density after 28 days of curing of the bricks; the higher the percentage of mining waste in the soil-cement brick, the higher the density value. This result can be justified by the better compaction of the bricks containing the mining waste in the mixture, with a consequent increase in the maximum dry density (γ_{dmax}) (Table 4). The presence of materials classified as very fine

in the manufacture of cementitious composites causes the voids of the composites to be filled (red arrows), thus increasing the density and strength of the product (Fig. 5).

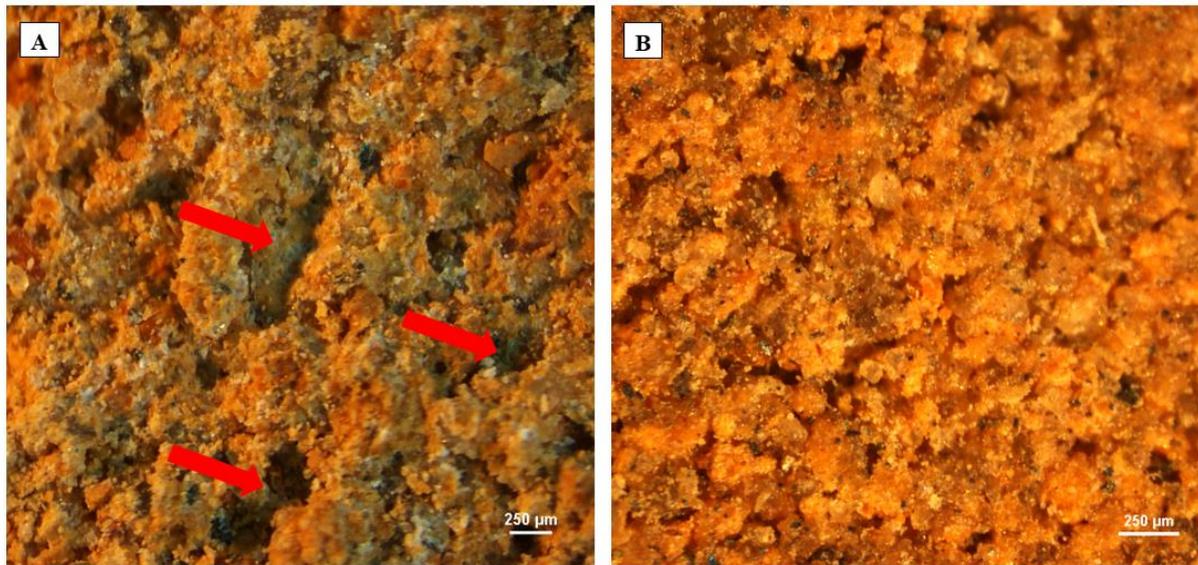


Fig. 5. Optical microscopy of soil-cement brick before accelerated ageing. (A) Without addition of the mining waste. (B) With 40% of mining waste.

With respect to aged bricks, there was no significant effect of the percentage of mining waste on the density. However, there was an increase in dry density when compared to bricks after 28 days of curing. This result can be justified by the extension of the matrix curing process, resulting in more compact bricks. The highest values observed were for treatments containing 10% and 30% waste, with an increase of 4.5 and 1.7%, respectively, compared to the bricks without ageing.

Table 5 presents the values found for degree of compaction and effective moisture content of the treatments.

Table 5
Degree of compaction and effective moisture content of soil-cement bricks

Treatment	DC (%)	Effective Moisture Content (%)
0% waste	96.65 ^(1.02)	13.55 ^(0.71)
10% waste	95.88 ^(2.09)	13.07 ^(1.53)
20% waste	95.11 ^(2.30)	12.86 ^(1.87)
30% waste	95.57 ^(0.85)	10.23 ^(0.61)

40% waste

95.67^(2.75)14.37^(0.32)

* Standard deviation values are given in parentheses.

According to Bueno and Vilar [20], the ideal range for the degree of compaction (DC) is between 95 and 105%. Thus, all evaluated treatments obtained ideal DC values, which means that during the production process of soil-cement bricks, all treatments reached optimal compaction. Considering that the DC is inversely proportional to the maximum dry density (γ_{dmax}), the higher the percentage of mining waste in the bricks, the higher the γ_{dmax} and, consequently, the greater the ability to achieve optimal compaction.

3.3.2 Water absorption and mass loss by immersion

Fig. 6 shows the water absorption values of soil-cement bricks with different percentages of mining waste, before and after ageing. It is observed that there was a significant effect of the percentage of mining waste on the water absorption of the bricks after 28 days of curing and after accelerated ageing. As the percentage of mining waste in the bricks increased, there was a reduction in water absorption. The highest percentage of waste (40%) resulted in the lowest absorption value, with 15.38 and 15.55% at 28 days of curing and after accelerated ageing, respectively. It is also observed that the greatest variation between 28 days of curing and ageing was obtained for the treatment with 30% waste, where there was a reduction of 2.40% in the water absorption values. The decrease in water absorption of the soil-cement bricks after accelerated ageing can be explained by the reduction in porosity of the matrix after ageing caused by the extension of the curing process of the product.

The decrease in water absorption with the increase in waste content is related to the higher γ_{dmax} obtained for these treatments (Table 4); the substitution of the soil by mining waste improves the particle packing and the compaction of the soil/cement/waste mixture, resulting in fewer voids and thus less water penetration [28-39]. This effect is primarily related to the particle size distribution of the waste, which behaves as a filler material, reducing the volume of large capillary pores in the matrix and the pozzolanic activity of the material (Figure 2), which promotes chemical bonds with Portland cement, resulting in a denser matrix [32, 34, 35, 36-42].

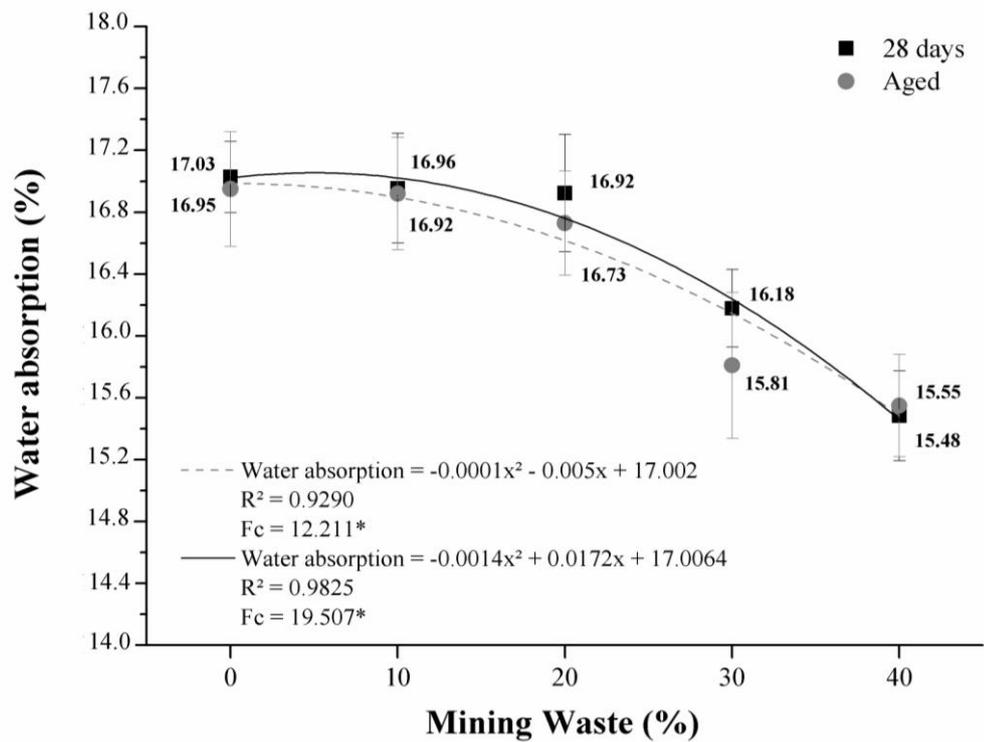


Fig. 6. Water absorption of the soil-cement bricks at 28 days of curing and after ageing. * Significant *P* value at 5% significance level.

The specific surface of the waste (1932 cm²/g) near the specific surface of the Portland cement (1700 cm²/g) also helps explain the decrease in water absorption by soil-cement-waste bricks because, since it is a pozzolanic material, it allows good interaction in the hydration reactions of the cementitious composite [21].

There is a relationship between the physical-mechanical properties of soil-cement bricks and their density because the lower number of voids in the bricks, the better particle packing, the better interaction between soil and aggregate (cement), and thus the higher strength values [33-37].

Thus, all evaluated treatments reached mean values lower than the maximum value stipulated by Brazilian standard NBR 8492 [12], which recommends 20% for water absorption. According to Villamizar et al. [43], the water absorption test can be used as an indicator of the strength of stabilized soils. Therefore, with regard to water absorption, soil-cement-waste brick has potential for use in civil construction.

Another important factor regarding the water absorption of the bricks can be observed in Fig. 7, which presents the results of the X-ray diffraction (XRD) test, where it was possible to identify and characterize the crystalline structure of the different materials used in the manufacture of soil-cement bricks.

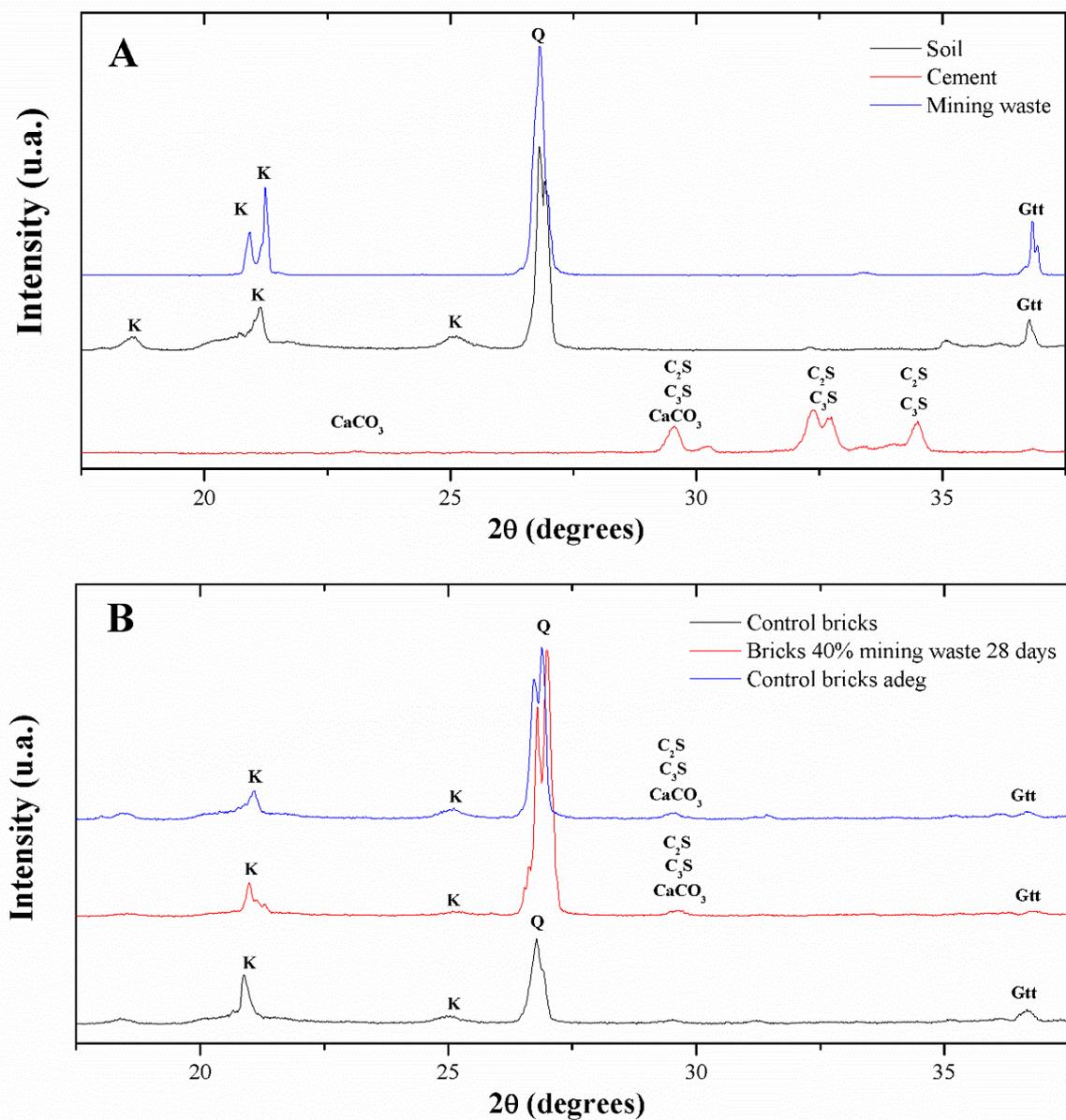


Fig. 7. Diffractogram (XRD). (A) Materials. (B) Bricks.
Q (Quartz), Gtt (Goethite), K (kaolinite), C₂S (Belite), C₃S (Alite) and CaCO₃ (calcium carbonate).

It is possible to observe the predominance of iron (Goethite) and aluminium (Gibbsite) oxyhydroxides, aluminosilicates (Feldspar and Quartz) and kaolinite (k) as main clay minerals. With regard to the CPV-ARI cement, the results showed the presence of calcium silicates, alite and belite, as well as tricalcium aluminate (C₃A), which is responsible for the strength on the first day of curing [19].

The kaolinite presents strong bonds that prevent the absorption of water; thus, it does not provide significant expansion when in contact with water [24]. Thus, the presence of kaolinite in the different materials indicates greater stability and quality for the production of soil-cement bricks with mining waste.

Regarding the mass loss by immersion, Fig. 8 shows the mean values of the different treatments at 28 days of curing and after accelerated ageing. There was no significant effect of the percentage of mining waste on the mass loss of the bricks before and after accelerated ageing. The control treatment obtained the highest values of mass loss-0.37 and 0.28% at 28 days of curing and after accelerated ageing, respectively. In turn, the treatment with 40% waste exhibited values of 0.26 and 0.24% before and after the accelerated ageing, respectively. This result can be explained by the increase in the compaction of the bricks containing mining waste (Table 4), which promoted good adhesion between the soil, waste and cement particles, preventing the loss of materials when the brick was in contact with the water [31].

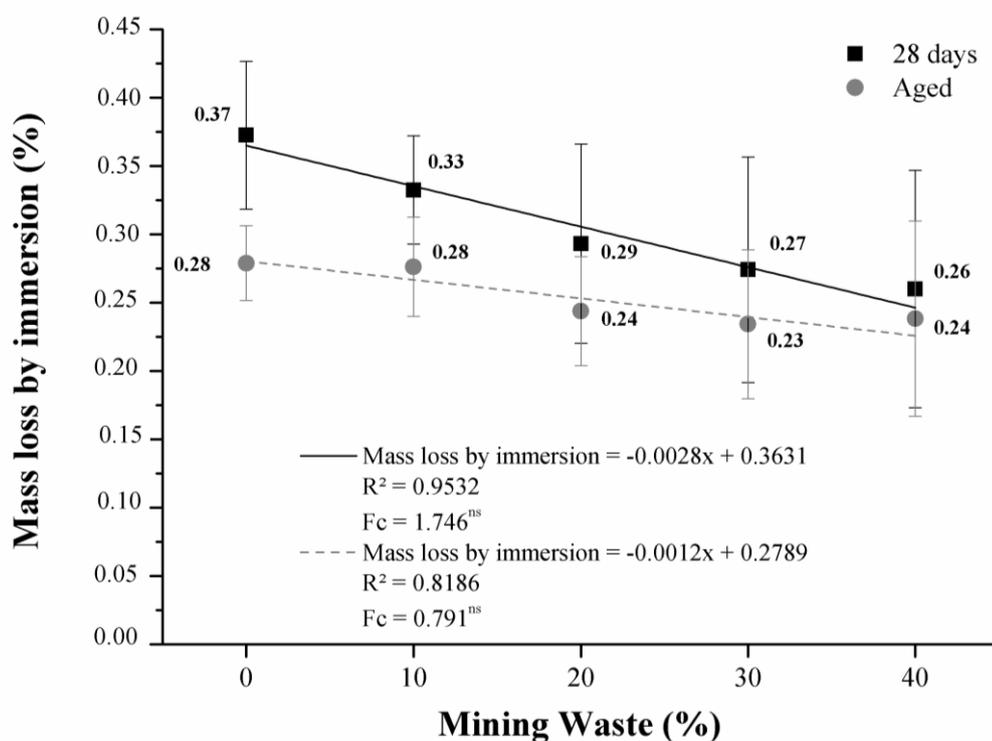


Fig. 8. Mass loss by immersion of soil-cement bricks at 28 days of curing and after ageing. ^{ns} Non-significant *P* value at 5% significance level.

3.4 Mechanical characterization of bricks

3.4.1 Compressive strength

The compressive strength of the soil-cement bricks with the addition of different percentages of mining waste are shown in Fig.9. There was no significant difference in the compressive strength after 28 days of curing of the bricks produced with the different percentages of waste evaluated. That is, the addition of waste did not change the compressive strength of soil-cement bricks. The highest value found was for the treatment containing 10%

waste, with 3.38 MPa, while the treatment that obtained the lowest compressive strength was for bricks produced with 40% waste, with 2.66 MPa, an approximately 21.3% reduction between treatments.

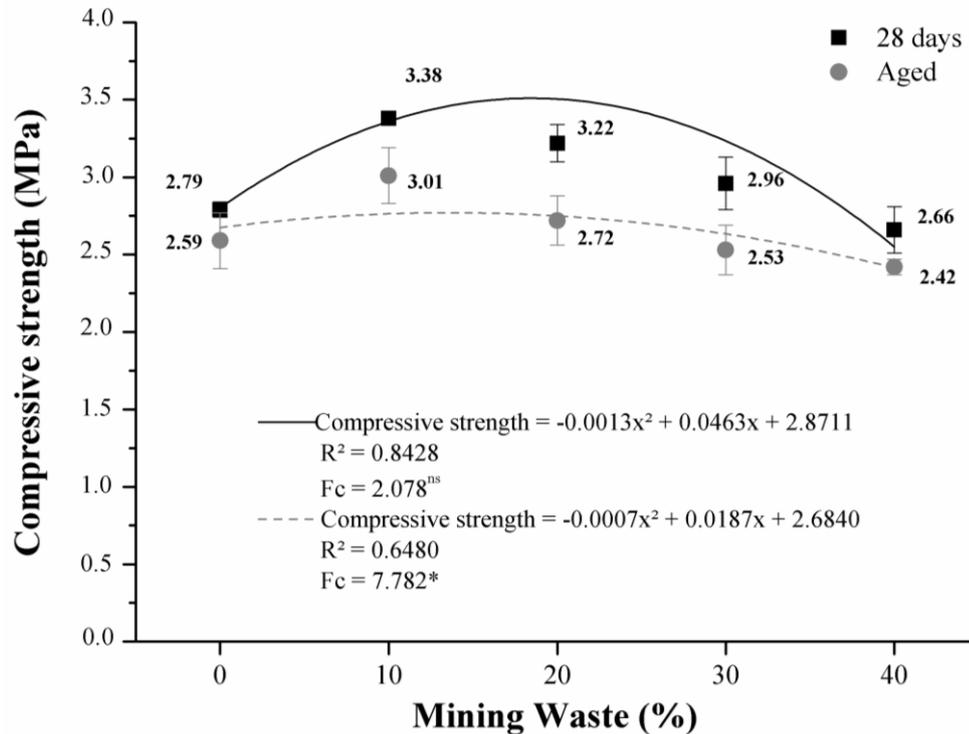


Fig. 9. Compressive strength of soil-cement bricks at 28 days of curing and after ageing. * Significant *P* value at 5% significance level. ^{ns} Non-significant *P* value at 5% significance level.

The maintenance of the strength until up to 40% waste is related to the amount of fine fraction present in the mixture, i.e., finer particles will fill the voids of the coarser particles, resulting in a denser, more rigid matrix with lower water absorption (Fig. 6) [37]. Another important point is related to the high SiO_2 content (Table 1) in the mining waste, which makes it a pozzolanic material capable of reacting with calcium hydroxide to form C-S-H phases. According to Sekhar and Nayak [37], these products are mandatory in the cement hydration process, as they are able to reduce the porosity and increase the density of the matrix.

Regarding to the compressive strength of the bricks after accelerated ageing, its behaviour was similar to that observed after 28 days of curing, although in this case there was a significant effect of the percentage of mining waste, with the increase of compressive strength with the use of 10% waste relative to the control treatment, followed by its reduction up to 40% waste. Although there was an increase in the dry density and reduction of the porosity of the bricks after accelerated ageing (Fig. 4), the reduction of the compressive strength occurred due

to the formation of microcracks in the matrix of the soil-cement brick, as indicated by the red arrows in Fig. 10.

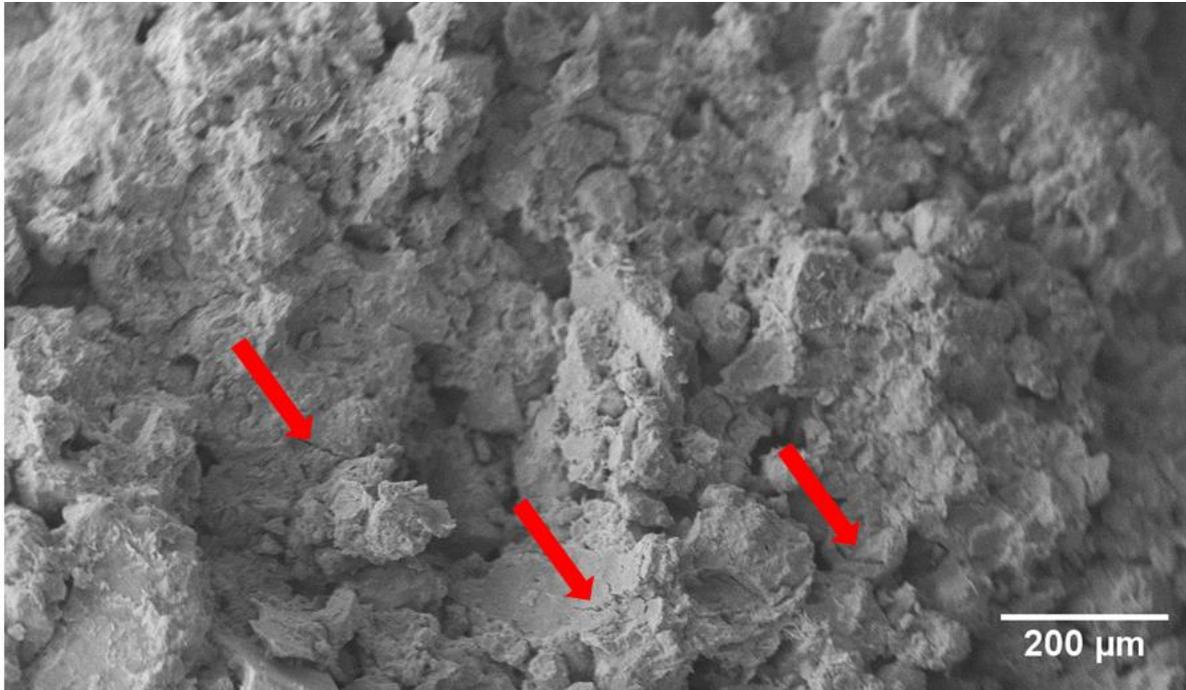


Fig. 10. Micrograph obtained by SEM of soil-cement brick, after accelerated ageing, containing 40% of mining waste.

According to NBR 8492 [12], the minimum compressive strength of soil-cement bricks should be 2.00 MPa. Therefore, all treatments analysed before and after accelerated ageing met the requirements of the standard, which makes soil-cement an excellent matrix for the use of this waste for residential construction.

3.5 Thermal Conductivity

The mean values of thermal conductivity for the evaluated treatments before and after the accelerated ageing are presented in Fig. 11. There was a significant effect of the percentage of mining waste on the thermal conductivity of the bricks at 28 days of curing and after ageing. The higher the percentage of mining waste in the soil-cement brick, the higher the thermal conductivity of the material. Bricks without the addition of waste obtained the lowest results, with 1.42 and 1.51 w/m.°C before and after ageing, respectively.

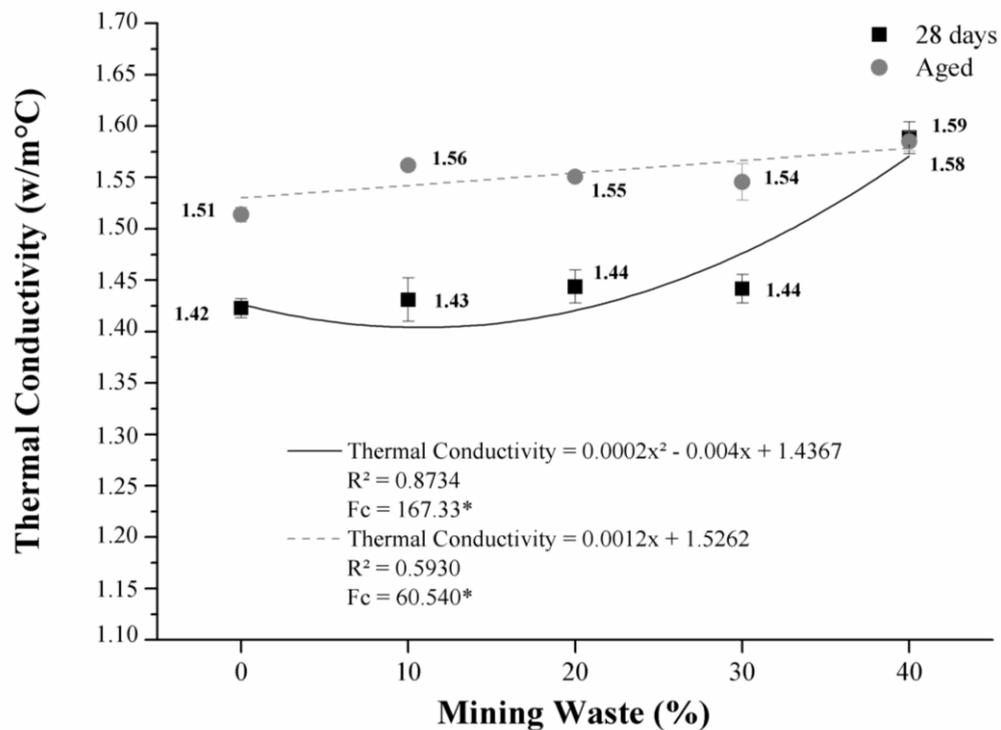


Fig. 11. Thermal conductivity of soil-cement bricks at 28 days of curing and after ageing. * Significant *P* value at 5% significance level.

The results show a 10.7% increase in thermal conductivity for a corresponding increase of 0 - 40% of mining waste for the bricks after 28 days of curing, whereas after ageing, the increase was 4.43%. These results indicate that the density of the soil-cement brick (Fig. 4) depends on the particle packing density and porosity of the material (Fig. 5), and the higher the brick density, the lower the porosity and, consequently, the higher the thermal conductivity [3-18].

In a study by Balaji et al. [18], the authors concluded that the thermal conductivity is directly related to the clay and cement content in the soil-cement brick mixture, as well as to the final density of the product. The authors found thermal conductivity values ranging from 1.066 to 1.303 w/m.°C under different densities (1.7 - 1.9 g/cm³). According to the NBR 15220 [17], the thermal conductivity for ceramic bricks ranges from 0.7 to 1.05 w/m°C between densities of 1.0 to 2.0 g.cm⁻³.

It can be concluded that the increase in the thermal conductivity of soil-cement-waste bricks is related not only to the density of the product but also to the mineralogical composition of the materials used in the mixture.

4 CONCLUSION

The increase of the percentage of mining waste promoted reduction of the water absorption of the bricks as a function of the increase in their density. Bricks produced with 10% waste obtained the highest mean compressive strength at 28 days of curing and after accelerated ageing; however, percentages 40% waste meet current commercial standards, being the most viable alternative for adding value to the disposal of solid mining waste.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Minas Gerais State Agency for Research and Development (FAPEMIG), National Counsel of Technological and Scientific Development (CNPq), Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and Graduate Program in Biomaterials Engineering of the Federal University of Lavras (UFLA).

REFERENCES

- [1].Alves, W. A.; Baldo, J. B. O potencial de utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico - Parte II. *Cerâmica. Industrial*, v. 3, n. 1/2, jan/abril. 1998.
- [2].Aristimunho, P.B.; Bertocini, S.R. Application of iron ore mud in powder form in portland cement presence. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* V.5 n.2, 153-165, 2012.
- [3].Ashour, T. et al. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings* 104 (2015) 139–146.
- [4].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada*. São Paulo - SP, 1985.
- [5].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Guia de construções rurais à base de cimento*. São Paulo – SP, 1985.
- [6].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 4 p. 2014.
- [7].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p. 1984.
- [8].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p. 1984.
- [9].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 13 p. 1984.
- [10]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 10 p. 1986.
- [11]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8491: Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, 5 p. 2012.
- [12]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 4 p. 2012.

- [13]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro, 3 p. 2012.
- [14]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 6 p. 1992.
- [15]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 6 p. 2014.
- [16]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13554: Solo-cimento Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 3 p. 1996.
- [17]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 21 p. 2003.
- [18]. Balaji, N. C. et al. Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. *Construction Materials* 170 February 2017 Issue CM1. Pages 40–54
<http://dx.doi.org/10.1680/jcoma.15.00032>
- [19]. Barbosa, W.; Portella, K. F. Síntese e caracterização das fases minerais C3S, C2S, C3A e C4AF para utilização em cimento tipo *Portland*. *Cerâmica* 65 (2019) 54-62.
- [20]. Bueno, B.S.; Vilar, O.M. *Mecânica dos solos*. Viçosa, MG: Ed. UFV, 1999. 131 p.
- [21]. Castro, A. L. de; Liborio, J. B. L.; Pondolfelli, V. C. The influence of cement type on the performance of advanced concretes designed by computing mix proportion technique. *Cerâmica*. v. 57, p. 10- 21, 2011.
- [22]. CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. Manual de construção com solo-cimento. São Paulo: CEPED, 1984.
- [23]. Chaib, H.; kriker, A.; mekehermeche, A. Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers. *Energy Procedia*, v. 74, p 919-925, 2015.
- [24]. Corrêa, A. A. R et al. Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva” in adobes. *Construction and Building Materials* 98 (2015) 250–256.
- [25]. Cuchierato, G. Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico. 2000. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências, USP, São Paulo.
- [26]. Da silva, F. L.; Araújo, F. G. S.; Castro, C. G.; Mendes, J. J.; Von Krüger, F. L. Recycling of Concentration Tailings of Iron Ore for the Production of Concrete Block (Pavers). *Materials Science Forum*. v. 775-776, p. 631-634, 2014.
- [27]. Gándia, R. M. et al. Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction and Building Materials* 222 (2019) 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>
- [28]. Guettala A, Houari H, Mezghiche B, Chebili R. Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir* 2002; 2:61–6.
- [29]. Hossain, K. M. A et al. Stabilized Soils Incorporating Combinations of Rice Husk Ash and Cement Kiln Dust. *Journal of materials in civil engineering*, 2011, 23(9): 1320-1327.
- [30]. Hossain, K.M.A., Mol, L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3495–3501.
- [31]. Jin, L.; Song W.; Shu X.; Huang B. Use of water reducer to enhance the mechanical and durability properties of cement-treated soil. *Construction and Building Materials* 159 (2018) 690–694.
- [32]. Kaniraj, S. R.; Havanagi, V. G. Compressive strength of cement stabilized fly ashsoil mixtures, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 673–677.

- [33]. Milani, A. P. 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.
- [34]. Oti, J. E.; Kinuthia, J. M.; Bai, J. Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks, *Eng. Geol.* 109 (2009) 230–240.
- [35]. Reddy, B. V. V.; Kumar, P. P. Cement stabilised rammed earth. part B: compressive strength and stress–strain characteristics, *Mater. Struct.* 44 (2011) 695–707.
- [36]. Sekhar, D. C.; Nayak, S. SEM and XRD investigations on lithomargic claystabilized using granulated blast furnace slag and cement, *Int. J. Geotech.Eng.* (2017), <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1380355>.
- [37]. Sekhar, D. C.; Nayak, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials* 166 (2018) 531–536, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
- [38]. Siqueira F. B. et al. Effect of incorporation of grits waste on the densification behavior of soil-cement bricks. *Cerâmica* 61 (2015) 414-419.
- [39]. Siqueira F. B.; Holanda J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. *Journal of Environmental Management* 131 (2013) 1-6.
- [40]. Souza M. I. B.; Segantini A. A. S.; Pereira J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.12, n.2, p.205–212, 2008.
- [41]. Souza MIB, et al. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.12, n. 2, p. 205-212, dez. 2008.
- [42]. Tripura, D. D.; Singh, K. D. Characteristic properties of cement-stabilized rammed earth blocks, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (7) (2015).
- [43]. Villamizar MCN, Araque VS, Reyes CAR, Silva RS. Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials* 36 (2012) 276–286.

**ARTIGO 2 - Inserção de partículas vegetais na produção de tijolo solo-cimento com
resíduos de mineração**

INSERÇÃO DE PARTÍCULAS VEGETAIS NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO COM RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

Resumo: A indústria da construção civil requer uma quantidade elevada de matéria-prima para a fabricação de produtos, resultando em uma grande extração dos recursos naturais. Uma opção para a redução do problema ambiental gerado por esse setor está na reutilização de resíduos provenientes de diversos setores industriais. Dentre esses resíduos se destacam aqueles provenientes do processo de mineração e também os gerados na agroindústria, com partículas vegetais. O primeiro, ocupa um espaço físico muito elevado por parte das mineradoras, além de contribuir para a poluição atmosférica, já o segundo vêm se destacando no mercado mundial como matéria-prima na construção civil, onde são utilizadas como reforço de materiais cimentícios. Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica de produção de tijolo solo-cimento com substituição parcial do solo pelo resíduo de mineração e diferentes tipos de partículas vegetais. As matérias-primas utilizadas foram o solo de classificação A-4, cimento CPV – ARI, resíduo sólido de mineração e partículas vegetais (eucalipto, pinus, casca de café e bagaço de cana). O traço utilizado para a produção dos tijolos foi de 48,5% de solo, 40% de resíduo de mineração, 10% de cimento e 1,5% de partículas, além de um traço controle (sem adição de partículas). As propriedades tecnológicas como densidade aparente, absorção de água, perda de massa por imersão, resistência à compressão, condutividade térmica e a microestrutura, antes e após o envelhecimento acelerado foram determinadas. Os resultados experimentais indicaram que as substituições do solo por partículas vegetais influenciaram negativamente nas propriedades físicas dos tijolos, entretanto todos os tratamentos atenderam as especificações das normas de comercialização do produto. Os tratamentos com casca de café e bagaço de cana, apresentaram valores de resistência à compressão inferiores ao estabelecido por norma, embora foram aqueles com melhores propriedades de condutividade térmica. Os tijolos produzidos com partículas de Pinus obtiveram os melhores resultados, levando em consideração as normas vigentes de caracterização.

Palavras-chaves: sustentabilidade, tijolo ecológico, propriedades físico-mecânicas, condutividade térmica.

Abstract: The construction industry requires a high amount of raw material to manufacture products, resulting in a large extraction of natural resources. One option for reducing the environmental problem generated by this sector is the reuse of waste from various industrial sectors. Among these residues stand out those from the mining process and also those generated in the agro-industry, with vegetal particles. The first one occupies a very high physical space on the part of the mining companies, besides contributing to the atmospheric pollution, while the second one has been standing out in the world market as raw material in the civil construction, where they are used as reinforcement of cementitious materials. Given this context, the present work aimed to evaluate the technical feasibility of producing soil-cement brick with partial replacement of the soil by mining residue and different types of plant particles. The raw materials used were A-4 classified soil, CPV - ARI cement, solid mining waste and plant particles (eucalyptus, pine, coffee husk and sugarcane bagasse). The trait used for the production of bricks was 48.5% of soil, 40% of mining waste, 10% of cement and 1.5% of particles, besides a control trait (without addition of particles). Technological properties such as bulk density, water absorption, immersion mass loss, compressive strength, thermal conductivity and microstructure before and after accelerated aging were determined. Experimental results indicated that the substitution of soil by vegetal particles negatively influenced the physical properties of the bricks, however all treatments met the specifications of the product commercialization norms. The treatments with coffee husk and sugarcane bagasse presented values of compressive strength lower than the standard, although they were those with better thermal insulation properties. Bricks made from Pinus particles obtained the best results, taking into account the current norms of characterization.

Keywords: sustainability, ecological brick, physical-mechanical properties, thermal conductivity.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil apresenta como um segmento que contribui de maneira positiva, no cenário econômico, para o desenvolvimento da população. Contudo, o crescimento acelerado deste setor proporciona um elevado consumo de matéria-prima necessária para produção de diferentes materiais empregados neste segmento, fazendo com que novos estudos busquem o desenvolvimento de produtos alternativos que possam contribuir de forma sustentável para este setor (SIQUEIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2016; SANTOS et al., 2019).

Produzidos a partir de uma mistura homogênea de solo, cimento e água, o tijolo solo-cimento apresenta como uma alternativa viável para construção de novas moradias, levando em consideração inúmeras vantagens, como a utilização de matéria-prima natural de alta disponibilidade, não utiliza o processo de queima do produto final, reduzindo a emissão de dióxido de carbono, além de apresentar como um material com grande potencial para incorporação de resíduos dos diversos segmentos industriais, desde que alcance os limites normatizados (MUNTOHAR, 2011; OLIVEIRA et al., 2014; JAMES et al., 2016). Dentre esses resíduos se destacam os rejeitos provenientes da indústria mineradora, que vêm ganhando espaço em diversos estudos como matéria-prima para a produção de novos materiais destinados à construção civil (HUANG et al., 2013; SILVA et al., 2014).

De acordo com dados da United States Geological Survey (USGS, 2019), Austrália, Brasil e China são os maiores produtores mundiais de minério de ferro, produzindo juntos aproximadamente 70% de todo o minério de ferro produzido no mundo no ano de 2018. O Brasil foi responsável pela produção de cerca de 490 milhões de toneladas de minério de ferro nesse mesmo ano. A alta produtividade dessa commodity se torna responsável pela geração de materiais estéreis e resíduos de processamento, vale ressaltar que o volume de rejeitos produzidos pelo processo de mineração pode variar de acordo com o tipo e teor de minério extraído e também com a eficácia do processo de beneficiamento do produto. O processo de mineração é responsável pela geração de aproximadamente 1,5 toneladas de resíduo para cada tonelada de ferro extraída, tornando passível sua aplicação como matéria-prima para fabricação de produtos destinados à construção civil, tendo como finalidade aperfeiçoar as propriedades físico-mecânicas do produto, além de reduzir impactos ambientais causados pela indústria mineradora, como é o caso do rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho no estado de Minas Gerais (Brasil) no ano de 2015 e 2019, respectivamente (ALVES & BALDO, 1998; SILVA et al., 2014).

De acordo com Lopes et al. (2011); Zak et al. (2016); Teixeira et al. (2018) e Xuan et al. (2018) os produtos aplicados na construção civil oriundos de matrizes cimentícias são caracterizados, em alguns casos, como frágeis, abrindo espaço para pesquisas que tendem a utilização de materiais de reforço nesse tipo de matriz, como é o caso das partículas e fibras vegetais provenientes de resíduos agroindustriais na fabricação de tijolos prensados (FARIA et al., 2012 ; MADURWAR et al., 2013 ; GANGA et al., 2014). Os resíduos vegetais podem ser provenientes de culturas florestais, do processamento da madeira, além de resíduos de culturas agrícolas geradas durante seu beneficiamento. Estima-se que a produção mundial de resíduos agroindustriais pode atingir 1,3 bilhão de toneladas por ano, segundo dados da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2013), levando em consideração que aproximadamente 30% dos alimentos destinados ao consumo humano no mundo são desperdiçados gerando resíduos.

A reutilização desses resíduos não pode ser deixada de lado, pois o processo de descarte pode ser em forma de matéria orgânica ou por queimas inadequadas, acarretando em um aumento considerável da poluição ambiental, além de representar perdas de matéria-prima e de possibilidade de agregação de valor (VALE & GENTIL 2008; TEIXEIRA et al., 2012; NAVAS et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2018). Estudos revelam que uma das principais vantagens da utilização dos resíduos vegetais em compósitos cimentícios está na capacidade de isolamento térmico do material.

Segundo Izquierdo et al. (2017), Teixeira et al. (2018) e Laibi et al. (2018) a redução da condutibilidade térmica desses compósitos é influenciada pela diminuição da densidade final do produto, fazendo com que aumente a quantidade de ar aprisionado na mistura. Assim, a produção de tijolos solo-cimento incorporados com diversos resíduos (industriais e agroindustriais) tornam o material propício para utilização como alvenaria de vedação, levando em consideração as propriedades físicas, mecânicas e térmicas, além de contribuir de maneira positiva para o descarte incorreto dos resíduos sólidos.

Diante do exposto, levando em consideração a alta disponibilidade dos resíduos de mineração e da agroindústria (Eucalipto, Pinus, casca de café e bagaço de cana de açúcar) no Brasil, o presente estudo objetivou avaliar a viabilidade da produção de tijolos solo-cimento incorporados com resíduos industriais e agroindustriais buscando a concepção de um novo produto com adequadas propriedades físicas, mecânicas e associadas ao conforto térmico para aplicação direta no setor de construção civil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

2.1.1 Solo e cimento

O solo utilizado para a confecção dos tijolos solo-cimento foi coletado no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras - MG, Brasil, sendo as coordenadas geográficas do ponto de localização 21°14'7" S de latitude e 44°58'21" O de longitude. Após a coleta, o material passou por um processo de peneiramento com o intuito de eliminar possíveis materiais que poderiam interferir na qualidade final do tijolo, em seguida realizou a separação granulométrica seguindo as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 2016). Para a produção de tijolos solo-cimento, a NBR 10833 (ABNT, 2012) fixa algumas condições como: 100% do solo passando na peneira de 4,75 mm (n° 4) e de 10% a 50% passando na peneira de 75 µm (n° 200).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1985), para produção de solo-cimento com maior durabilidade, se faz necessária a utilização de solos que apresentam um teor de areia entre 50 e 90%. Dessa forma, foi realizada a classificação do solo coletado e constatou uma baixa porcentagem de areia, em torno de 36%, sendo necessário realizar sua correção com o objetivo de torná-lo arenoso. Após a correção, o solo foi analisado e apresentou um teor de areia ideal (56%) para a produção dos tijolos.

Para determinação do índice de retração do solo foi realizado o ensaio de acordo com os procedimentos apresentados pelo CEPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, 1984), tal ensaio tem como objetivo, verificar na composição dos solos, a presença de argilas expansivas que comprometem o desempenho dos tijolos em virtude da retração durante o processo de secagem do compósito. De acordo com as recomendações do CEPED (1984), a soma das leituras de retração nas extremidades do solo deve ser inferior a 20 mm e a amostra não deve, após sete dias, apresentar nenhuma fenda transversal na parte central do molde.

Com o intuito de determinar o limite de consistência do solo foi realizado o ensaio de acordo com os procedimentos descritos na NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre os valores obtidos nos ensaios para determinação do limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Com os resultados da classificação do solo e empregando-se a classificação utilizada pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2018), verificou-se a recomendação do percentual de cimento a ser incorporado no solo para a fabricação dos tijolos.

O ensaio de compactação do tipo Proctor Normal foi realizado para determinação dos valores de umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima, para moldagem dos

tijolos. O ensaio foi realizado em conformidade com os requisitos da NBR 7182 (ABNT, 2016) e NBR 12023 (ABNT, 2012). As curvas foram obtidas para os solos com adição de cimento, resíduo de mineração e partículas vegetais (eucalipto, pinus, casca de café e bagaço de cana).

A estabilização do tijolo solo-cimento está diretamente ligada ao tipo de solo e cimento utilizados na mistura. Sendo assim, optou-se por empregar CPV – ARI (Cimento Portland de Alta resistência Inicial), além de apresentar resistência inicial elevada e proporcionar a desforma rápida do compósito.

2.1.2 Resíduo de mineração

O resíduo de mineração, utilizado na produção dos tijolos solo-cimento, foi doado pela empresa Samarco S/A, sendo coletado na Barragem do Fundão localizada na cidade de Mariana – MG. O processo de caracterização química e mineralógica do resíduo, foi realizado no Laboratório químico da Samarco. Durante a caracterização foram determinados os teores de Al_2O_3 (óxido de alumínio), com auxílio de um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP- OES), Fe (ferro) obtidos por dicromatometria e os teores de SiO_2 (dióxido de silício) determinados por diferença.

Além dessas caracterizações foram determinados os teores de Al (alumínio), Fe (ferro), pH e a classificação do material quanto a textura (argila, silte e areia). A Tabela 1 apresenta a composição química e as propriedades físico-químicas do resíduo de mineração.

Tabela 1 - Composição química e propriedades físico-químicas do resíduo de mineração.

Composição química	Teor (%)
Fe	13,63
SiO_2	79,60
P	0,011
Al_2O_3	0,20
LOI	0,43
Propriedades	Valores
pH	6,8
Argila	52 (dag/kg)
Silte	16 (dag/kg)
Areia	32 (dag/kg)
Classificação do material	Tipo 3 – Textura Argilosa

LOI = perda na ignição, massa de umidade e material volátil (água e dióxido de carbono).

A análise granulométrica do resíduo de mineração foi realizada seguindo as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 2016). Dessa forma, o resíduo de mineração foi caracterizado como material muito fino, possuindo valores do módulo de finura de 4,78mm e dimensão máxima característica das partículas de 0,25mm. Para determinar a massa específica do resíduo foi

utilizado o frasco de Chapman, o qual obteve um valor de $2,703\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, também foi avaliada a superfície específica do material, determinada pelo método de Blaine, que apresentou valor de $1932\pm 58\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$.

2.1.2 Partículas vegetais

Foram utilizadas partículas vegetais de Eucalipto, Pinus, casca de café e bagaço de cana (Figura 1). As partículas de eucalipto e pinus foram obtidas por meio dos resíduos gerados durante o processo de laminação da madeira. Já a casca de café foi coletada em secadores mecânicos responsáveis pela secagem dos grãos, e o bagaço de cana fornecido por uma usina de álcool. Após a coleta, as partículas passaram por uma classificação granulométrica, sendo utilizadas para produção dos tijolos solo-cimento, aquelas passantes na peneira de 35 mesh e retidas na peneira de 60 mesh.

A caracterização morfológica das partículas vegetais foi realizada mediante a utilização do software Image J. Para cada tipo de partícula foi realizada 30 leituras para a obtenção da largura e 30 leituras para a obtenção do comprimento, dessa forma, foi determinado o índice de esbeltez (relação entre o comprimento e a largura da partícula).



Figura 1 – Partículas vegetais. (A) Eucalypto; (B) Pinus; (C) Casca de café e (D) Bagaço de cana.

Com o auxílio do moinho de rotor tipo *Willey*, as partículas foram transformadas em serragens e classificadas, sendo utilizadas as partículas retidas na peneira de 60 mesh para caracterização química e física do material. As análises das partículas vegetais (umidade controlada) foram realizadas em conformidade com as metodologias apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise química e física das partículas vegetais.

Análises químicas	Metodologias
Extrativos totais	NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Holocelulose	[100-(LT + ET + CZ)]*
Teor de cinza	NBR 13999 (ABNT, 2017)
Análises físicas	Metodologias
pH	pH-metro digital
Densidade básica	NBR 11941 (ABNT, 2003)

*LT=lignina total; ET=extrativos totais; CZ=cinzas. Fonte: Do autor (2019).

2.2 Métodos

2.2.1 Moldagem e caracterização dos tijolos solo-cimento

Para cada tratamento foram produzidos 15 tijolos para avaliação das propriedades físicas, mecânicas, térmicas e microestruturais. O delineamento experimental pode ser observado na Figura 2. A porcentagem de cimento determinada segundo a recomendação da ABCP (2004), considerando a caracterização do solo de acordo com a HRB (1961) foi de 10%. A quantidade de água para cada formulação foi determinada por meio do ensaio de Proctor normal.

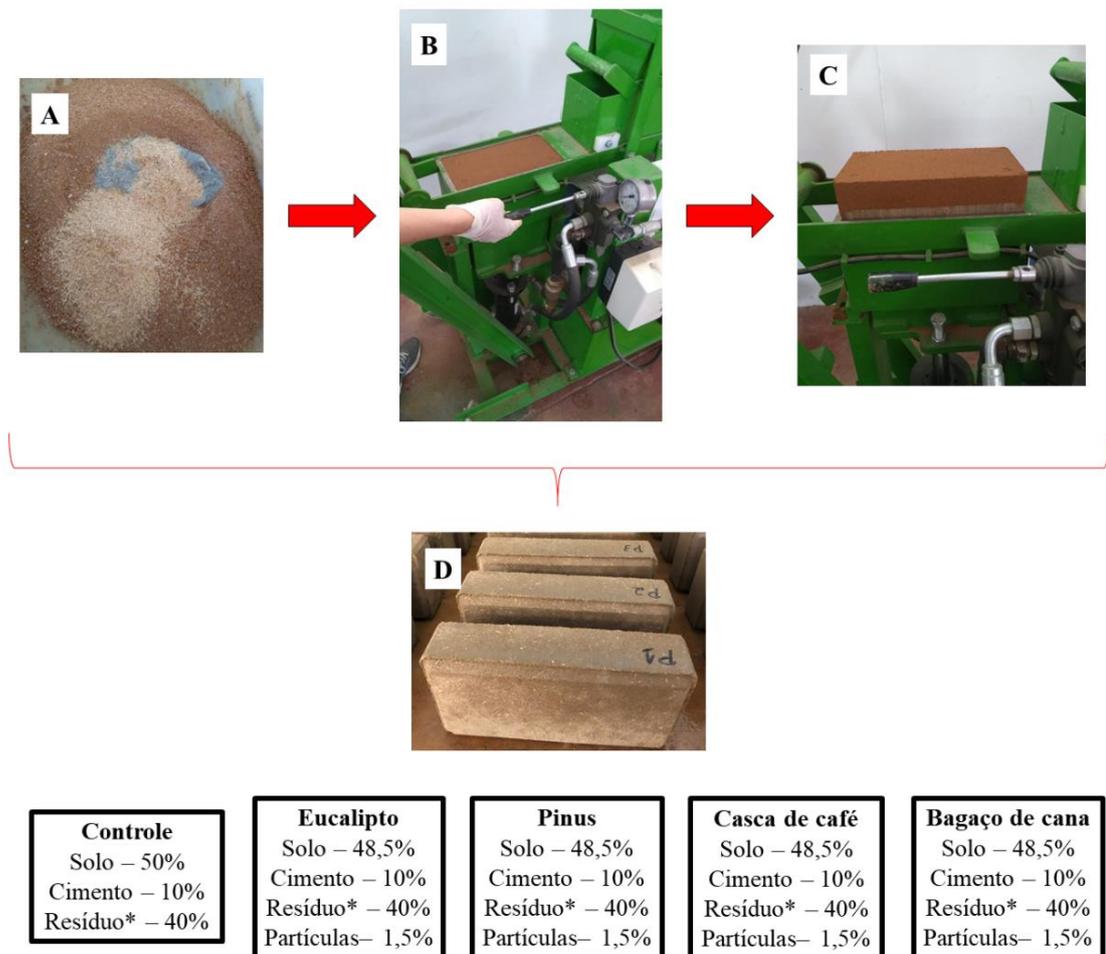


Figura 2 – Produção dos tijolos solo-cimento e delineamento experimental. (A) homogeneização da mistura; (B) compactação e moldagem do tijolo; (C) desforma e (D) tijolo solo-cimento. * Resíduo de mineração.

Os tijolos foram confeccionados nas dimensões de 25,0 x 12,5 x 5,0cm (comprimento, largura e espessura), de acordo com os requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2012), com o auxílio de uma prensa hidráulica com motor de 7,5cv da empresa Verde Equipamentos. Posteriormente à produção, os tijolos solo-cimento foram acondicionados em local coberto e curados por aspersão (ciclos de molhagem diária) durante 7 dias consecutivos, conforme recomendações da NBR 10833 (ABNT, 2012). Após 28 dias da moldagem, foi realizado a caracterização dos tijolos solo-cimento.

O grau de compactação dos tijolos foi determinado por meio da Equação 1.

$$GC = \frac{\gamma d}{\gamma d_{m\acute{a}x}} \quad (1)$$

Em que:

GC é o grau de compactação

γ_d é a massa específica aparente seca do tijolo (g.cm^{-3})

$\gamma_d \text{ máx}$ é a massa específica aparente seca máxima (g.cm^{-3})

Sendo que a massa específica aparente seca (γ_d) dos tijolos foi determinada de acordo com as Equações 2 e 3.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (2)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (3)$$

Em que:

γ é a massa específica do tijolo (g.cm^{-3})

M é a massa do tijolo recém-fabricado (g)

V é o volume do tijolo (cm^3)

W é a umidade da matéria prima para fabricação dos tijolos (g.g^{-1})

Para determinação da densidade aparente e absorção de água dos tijolos, foi utilizado os procedimentos descritos na NBR 8492 (ABNT, 2012). O método para obtenção da perda de massa por imersão foi seguido de acordo com a ME-61 (ME, 2003), e utilizada a seguinte equação (4).

$$Pi = \frac{Md \times 100}{Mo} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

M_d é a massa do solo seco, da parte desprendida do corpo-de-prova (g);

M_o é a massa do solo seco (g);

Pi é a perda de massa por imersão (%).

A resistência à compressão simples foi determinada no 28º dia após a fabricação dos tijolos, com o auxílio de uma máquina universal de ensaios universal, modelo WDW-300 E, seguindo as recomendações da NBR 8492 (ABNT, 2012).

O ensaio de análise térmica foi realizado com auxílio de uma câmara produzida com painéis MDP (medium density particleboard) e camadas de revestimento para isolar o ambiente externo. No interior da câmara, parte inferior, contém uma fonte de calor (lâmpada incandescente) conectada a um termostato que manteve a temperatura em 50,0 °C. Na parte superior da câmara e entre as amostras (tijolos), foram colocados sensores que puderam capturar as respostas obtidas durante o ensaio. Estas foram armazenadas em Datalog e enviadas ao computador para comparação e armazenagem de dados. A diferença de temperatura para estabilização foi obtida com um tempo de amostragem de 13,3 horas (GANDIA et al., 2019). A determinação da condutividade térmica que atravessa os tijolos foi obtida através da Equação (5).

$$K = \frac{P \times E}{\Delta T} \quad (5)$$

Em que:

K é a condutividade térmica em $W (m \cdot ^\circ C)^{-1}$,

P é a radiação da lâmpada incandescente em $W \cdot m^{-2}$,

E é a espessura da amostra em m, e,

ΔT é a diferença de temperatura para a estabilização (°C).

Os tijolos passaram por um envelhecimento acelerado, segundo os procedimentos descritos pela NBR 13554 (ABNT, 2012), que classifica a durabilidade do tijolo solo-cimento por molhagem e secagem. Os tijolos foram submetidos a seis ciclos de molhagem e secagem, sendo posteriormente realizados os testes de absorção de água, densidade, perda de massa, resistência à compressão e condutividade térmica. Cada ciclo foi composto por imersão em água por 5 horas e posterior secagem em temperatura de $71 \pm 2^\circ C$ por período de 42h.

Para avaliar a interação das partículas vegetais com a matriz foi utilizado um Microscópio Estereoscópio com Epi-fluorescência SMZ 1500 (Nikon), com aumentos de 7,5x a 112,5x. As análises foram realizadas antes e após envelhecimento acelerado dos tijolos.

A análise dos resultados foi realizada por estatística descritiva e experimental. Os experimentos foram avaliados em delineamento inteiramente casualizado. Foi realizada análise de variância e teste de média de Scott-Knott, ambos a 5% de significância de erro, com auxílio do software SISVAR 5.6. Os resultados obtidos foram confrontados com a norma de

comercialização para absorção de água NBR 8492 (ABNT, 2012), perda de massa por imersão (ME-61, 2003) e compressão simples NBR 8492 (ABNT, 2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Solo e resíduo de mineração

A Tabela 3 apresenta a classificação do solo pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e os limites de Atterberg.

Tabela 3 - Classificação do solo.

Propriedades	Valores (%)
Limite de Liquidez (LL)	30,63
Limite de Plasticidade (LP)	20,73
Índice de Plasticidade (IP)	9,90
Limite de retração (mm)	8,64
Passante na peneira de 75 µm	38
Índice de Grupo (IG)	0,60
Classificação AASHTO	A-4

Os valores do limite de liquidez, limite de plasticidade e do índice de plasticidade, estão de acordo com os valores descritos pela ABCP (1986) e NBR 10833 (ABNT, 2012). De acordo com Rodrigues et al. (2013), valores do índice de plasticidade em torno de 9,5% é típico de material rico em partículas de quartzo, fato de alta relevância na estabilização de solos com utilização de cimento. Sendo assim, o solo utilizado para a produção dos tijolos foi classificado como A-4, de acordo com os requisitos AASHTO, sendo recomendado 10% em massa de cimento para a produção dos tijolos solo-cimento (ABCP, 1986).

Djelloul et al. (2018) afirmam que quando o cimento é misturado com o solo, ocorre o processo de hidratação do cimento e, conseqüentemente, reações na matriz solo-cimento que resultam na diminuição do limite de liquidez e índice de plasticidade do compósito, aumentando assim o limite de retração da matriz. Dessa forma, ao avaliar o limite de retração do solo utilizado na pesquisa foi obtido um valor médio de 8,64mm, o que tornou o material propício para a fabricação de tijolos estabilizados com cimento.

Leonel et al. (2017) avaliando a caracterização de tijolos solo-cimento com incorporação de areia descartada da fundição, observaram um elevado valor do limite de liquidez (53,86%) no solo. Sendo assim, os autores concluíram que esse valor foi indicativo de baixo teor de quartzo no solo, que poderia, portanto, ser definido como argila plástica, sendo necessária adição de 30% de areia (quartzo) ao solo para reduzir o limite de liquidez para 37,21% e torná-lo propício para a produção dos tijolos.

A Figura 3 apresenta as curvas de compactação de todos os tratamentos, enquanto que a Tabela 4 apresenta a equação de cada curva, os valores de umidade ótima (W_{ot}) e massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d \text{ máx.}}$).

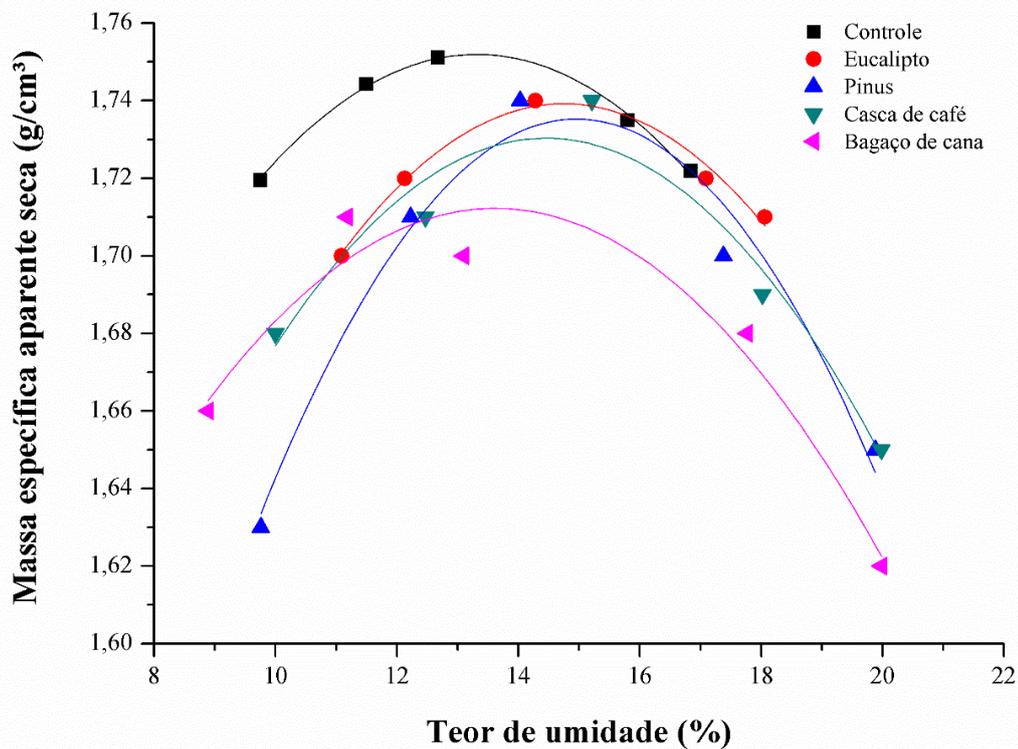


Figura 3 - Curvas de compactação para cada tratamento.

Tabela 4 - Valores médios de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Tratamento	Equação da curva	Umidade Ótima W_{ot} (%)	Massa específica aparente seca máxima $\gamma_{d \text{ máx.}}$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Controle	$\gamma_d = -0,0025x^2 + 0,0669x + 1,3065$ $R^2 = 0,9944$	13,33	1,75
Eucalipto	$\gamma_d = -0,0027x^2 + 0,081x - 1,1365$ $R^2 = 0,9403$	14,84	1,73
Pinus	$\gamma_d = -0,0038x^2 + 0,1145x + 0,8806$ $R^2 = 0,9685$	14,94	1,74
Casca de café	$\gamma_d = -0,0028x^2 + 0,0805x + 1,1504$ $R^2 = 0,9508$	14,42	1,73
Bagaço de cana	$\gamma_d = -0,0022x^2 + 0,0595x + 1,3096$ $R^2 = 0,9296$	13,75	1,71

Tendo em vista os valores de umidade ótima (W_{ot}) e massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d \text{ máx.}}$), pode-se observar um aumento da umidade ótima e uma redução da massa específica, em todos os tratamentos com inserção das partículas vegetais, dando destaque para o tratamento com partículas do bagaço de cana, que obteve o menor valor de $\gamma_{d \text{ máx.}}$ ($1,71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), ou seja, uma redução de aproximadamente 2,3% em comparação ao tratamento controle.

Esse fato pode ser justificado pela densidade básica do bagaço de cana apresentar valor reduzido ($0,099 \text{ g.cm}^{-3}$), resultando em uma mistura com baixa massa específica.

A massa específica aparente seca máxima (Tabela 4) reduziu em função da inserção das partículas vegetais na matriz controle (solo + cimento + resíduo de mineração), variando de $1,74 \text{ g.cm}^{-3}$ para $1,71 \text{ g.cm}^{-3}$. Dessa forma, o material apresentou menos compacto em relação ao tratamento controle, isto significa que não ocorreu uma acomodação das partículas durante o processo de compactação. A tendência é que o resultado acima observado, poderá influenciar significativamente nas propriedades físico-mecânicas do tijolo solo-cimento (JIN et al., 2018).

A Figura 4 apresenta os valores médios da resistência à compressão obtidos por meio do ensaio de pozolanicidade do resíduo de mineração.

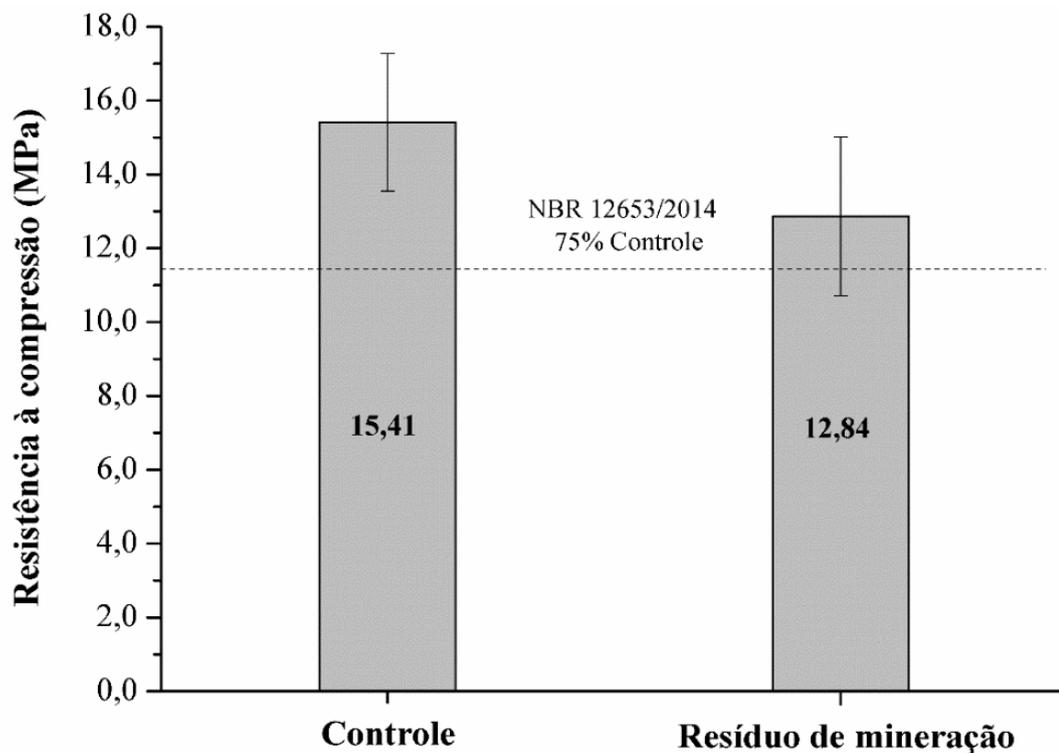


Figura 4 - Resistência à compressão no ensaio de pozolanicidade.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) estipula o valor mínimo de 75% para o índice de atividade pozolânica (IAP) utilizando o cimento *Portland*. Com base nos resultados apresentados, o IAP da argamassa contendo resíduo de mineração foi de aproximadamente 83%. Dessa forma, pode-se constatar que o resíduo de mineração obteve um bom desempenho mecânico e pode ser considerado um material pozolânico, esse fato está relacionado com a elevada área superficial do resíduo ($1932 \pm 58 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$) (KATARE; MADURWA, 2020).

Em estudo desenvolvido por Katare e Madurwa (2020) os autores relataram a adequação da cinza de caldeira como material pozolânico, para tanto foi determinado o índice de atividade pozolânica do material. Os valores encontrados aumentaram de 52,65% (cinza de caldeira antes da moagem) para 85,23% (após moagem mecânica), concluindo que as dimensões das partículas afeta de maneira positiva na reação de hidratação da matriz de cimentícia.

3.2 Caracterização das partículas vegetais

As caracterizações morfológicas das partículas de Eucalipto, Pinus, casca de café e bagaço de cana podem ser visualizadas na Tabela 5. Pode-se observar que as partículas de pinus obtiveram o maior valor de comprimento, sendo este de 0,354mm, diferenciando estatisticamente das partículas de eucalipto (0,273mm), bagaço de cana (0,278mm) e casca de café (0,186mm). As partículas de casca de café obtiveram o menor valor de comprimento médio entre os materiais de reforço avaliados. Em relação à largura das partículas, observou-se que o bagaço de cana apresentou o menor valor (0,048mm), diferenciando estatisticamente das partículas de eucalipto, pinus e casca de café.

Tabela 5 - Caracterização morfológica das partículas vegetais.

Partículas	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Índice de Esbeltez
Eucalipto	0,273 ^(0,069) B	0,074 ^(0,014) B	3,861 ^(1,268) A
Pinus	0,354 ^(0,150) C	0,067 ^(0,036) B	7,074 ^(4,881) B
Casca de café	0,186 ^(0,036) A	0,082 ^(0,023) B	2,496 ^(1,033) A
Bagaço de cana	0,278 ^(0,075) B	0,048 ^(0,012) A	6,089 ^(1,972) B

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Valores de desvio padrão são fornecidos entre parênteses.

O parâmetro de índice de esbeltez é caracterizado pela relação entre comprimento e largura das partículas, ou seja, partículas finas e longas derivam um maior índice de esbeltez, como é o caso das partículas de Pinus e bagaço de cana (Figura 1), que alcançaram os maiores valores, 7,074 e 6,089, respectivamente. De acordo com Quintilio et al. (2011), a maior razão entre comprimento e largura deve proporcionar a melhor propriedade de reforço das partículas nos tijolos. Teixeira et al. (2018) avaliaram a utilização de diferentes materiais lignocelulósicos (eucalipto, casca de café, pseudocaule da bananeira e casca de coco) na produção de compósitos cimentícios e encontraram valores médios de 4,92 e 2,52 para o índice de esbeltez das partículas de eucalipto e casca de café, respectivamente.

O índice de esbeltez das partículas vegetais influencia diretamente na área de contato com a matriz cimentícia, sendo que quanto maior a área de contato, maior será a aderência

partícula/matriz, acarretando em compósitos mais estáveis e, conseqüentemente melhores resultados de propriedades mecânicas (BALDIN et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2018). Outro ponto importante é que o comprimento das partículas auxilia na transferência de carga da matriz para o material de reforço (SAVASTANO et al., 2009).

Na Tabela 6 é possível verificar a análise química e física das partículas vegetais (eucalipto, pinus, casca de café e bagaço de cana).

Tabela 6 - Análise química e física das partículas vegetais.

Características	Partículas vegetais			
	Eucalipto	Pinus	Casca de café	Bagaço de cana
Holocelulose (%)	68,83 ^(0,13) C	68,72 ^(0,65) C	45,47 ^(0,84) A	59,15 ^(0,47) B
Lignina (%)	24,10 ^(0,53) B	26,09 ^(0,18) C	19,17 ^(0,26) A	20,10 ^(0,20) A
Extrativos (%)	5,99 ^(0,17) B	4,95 ^(0,16) A	28,41 ^(0,27) D	19,86 ^(0,18) C
Cinzas (%)	0,99 ^(0,15) B	0,24 ^(0,03) A	6,95 ^(0,17) C	0,88 ^(0,01) B
pH	6,16 ^(0,02) D	5,39 ^(0,01) A	5,43 ^(0,01) B	5,77 ^(0,01) C
Densidade básica (g.cm ⁻³)	0,561 ^(0,007) D	0,504 ^(0,004) C	0,174 ^(0,002) B	0,099 ^(0,002) A

Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Valores de desvio padrão são fornecidos entre parênteses.

Observa-se que a porcentagem de holocelulose das partículas de Eucalipto e Pinus foram estatisticamente iguais, e que as partículas da casca de café e bagaço de cana apresentaram os menores valores médios, 45,47% e 59,15%, respectivamente. Para o teor de lignina, os menores resultados encontrados foram de 19,17% (casca de café) e 20,10% (bagaço de cana), diferindo estatisticamente das outras partículas analisadas. O teor de extrativos apresentou diferença estatística entre as partículas de eucalipto, pinus, casca de café e bagaço de cana, sendo o maior valor obtido de 28,41% (casca de café) e o menor obtido de 4,95% (pinus). Analisando a porcentagem de cinzas, verificou-se diferença estatística entre as partículas, ficando o menor valor médio para as partículas de pinus (0,24%) e o maior para a casca de café (6,95%).

Os compostos químicos liberados pelas partículas vegetais, reduzem o tempo de endurecimento da matriz cimentícia, a explicação se dá pelo fato de que alguns componentes químicos podem fixar o cálcio presente na matriz, impedindo a formação de estruturas de CSH (silicato de cálcio hidratado) influenciando na estabilização do solo (SAVASTANO et al., 2000; SEDAN et al.; 2008). Segundo Chafei et al. (2014), o teor de extrativos presentes nas partículas vegetais podem influenciar o tempo de hidratação do cimento, resultando na redução da resistência mecânica do produto final, sendo assim, uma menor concentração de extrativos implica em benefícios na ligação partículas/matriz (SELLAMI; MERZOUND; AMIZIANE, 2013). Outros componentes químicos como a hemicelulose e a lignina podem afetar a inibição

do processo de cura do cimento (BILBA et al., 2003; SATANCATO et al., 2005; SELLAMI et al., 2013; CHAFEI et al., 2014).

Com relação ao pH, observa-se que as partículas apresentam valores de pH ácido, entre 5,39 e 6,16. O processo de degradação das partículas vegetais em matrizes de cimento *Portland* se deve ao alto ambiente alcalino da mistura que dissolve as fases de lignina e hemicelulose, prejudicando assim a estrutura da fibra. Além disso, a durabilidade dos compósitos de cimento reforçado com partículas vegetais está relacionada à capacidade de resistir a características internas como as alterações volumétricas, compatibilidade entre partícula/matriz dentre outras, e também características externas ao ambiente como as variações climáticas, ataque de agentes químicos, dentre outros (GRAM, 1983).

Houve diferença estatística entre os valores de densidade básica dos diferentes tipos de partículas lignocelulósicas avaliadas. As partículas de eucalipto obtiveram a maior média ($0,561\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), enquanto as partículas de bagaço de cana resultaram no menor valor ($0,099\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Nacif et al. (2013) relatam que a densidade do material de reforço em matrizes cimentícias interfere diretamente nas propriedades dos compósitos, tendo em vista que uma densidade reduzida facilita a dispersão das partículas na mistura, além da redução da densidade do produto final, resultando em um material mais leve e melhorando a aplicabilidade a estruturas de menor peso (NACIF et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2018).

Entretanto, tendo em vista que a quantidade de partículas vegetais utilizada na pesquisa é pequena (1,5% em massa), e levando em consideração que a fração de cimento na mistura é de 10%, é possível que a composição química e física do material vegetal não irá influenciar no processo de cura do compósito, não inviabilizando a inserção das partículas em tijolos solo-cimento.

3.3 Caracterização física e mecânica dos tijolos

Na Figura 5 são apresentados os valores médios da densidade aparente, antes e após envelhecimento, dos tijolos solo-cimento para os diferentes tratamentos analisados.

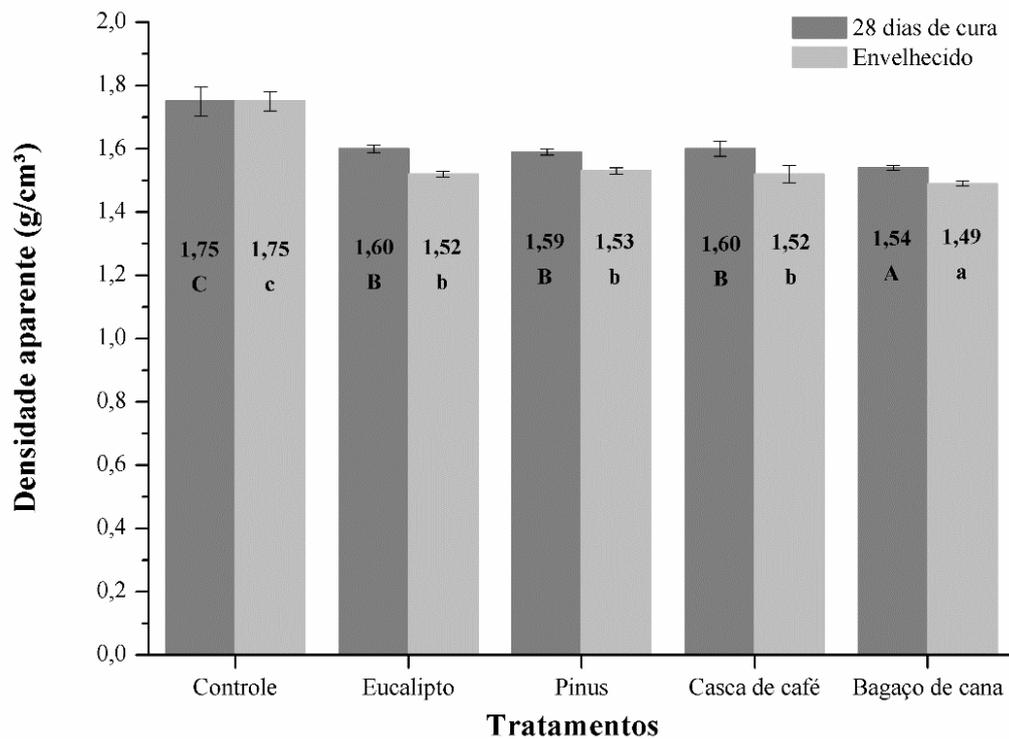


Figura 5 - Densidade aparente dos tijolos solo-cimento aos 28 dias de cura e após envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra (maiúscula – 28 dias; minúscula – envelhecido) não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Observa-se que houve uma redução significativa na densidade dos tijolos após a inserção das partículas vegetais, dando destaque para o tratamento contendo partículas do bagaço de cana, que apresentou uma redução de aproximadamente 12% no valor da densidade aparente, em comparação com o tratamento controle aos 28 dias de cura. O mesmo comportamento pode ser observado para os tijolos submetidos ao envelhecimento acelerado, sendo que o tratamento com inserção de partículas do bagaço de cana apresentou uma redução de aproximadamente 15% em relação ao tratamento controle. Esse fato pode ser justificado pela baixa densidade das partículas, conforme apresentado na Tabela 6, que resultou em um maior volume de partículas adicionadas ao tijolo solo-cimento, e também pela redução do γ_d máx (Tabela 4) que aumentou a quantidade de poros na matriz (setas amarelas), como pode ser observado na figura 6.

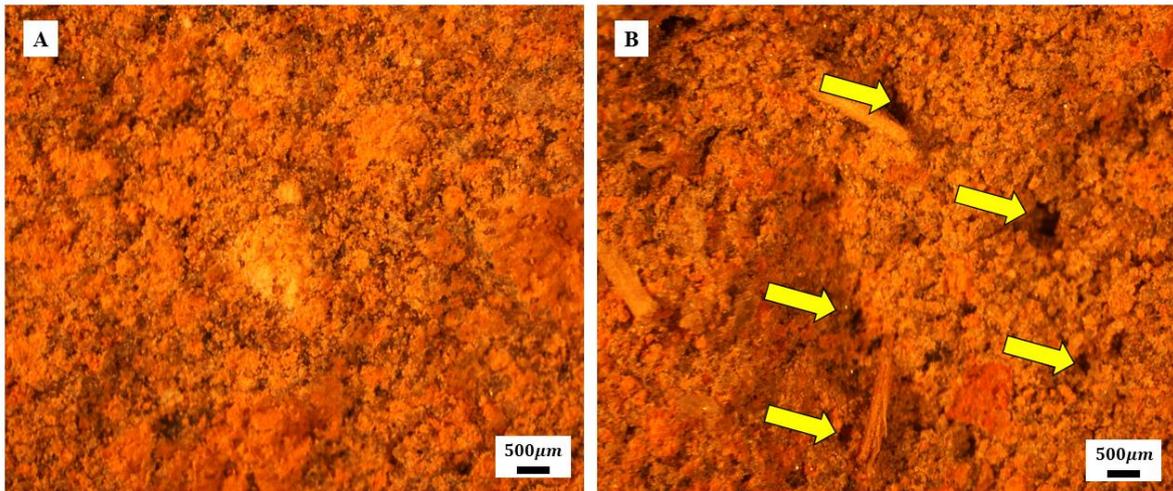


Figura 6 - Microscopia óptica do tijolo solo-cimento, aos 28 dias de cura. (A) Tratamento controle. (B) Tratamento com partículas do bagaço de cana. Aumento de 10x.

Zak et al. (2016) em seus estudos utilizando solo, cimento, gesso e fibras vegetais, encontraram um decréscimo da densidade aparente à medida que adicionaram as fibras linho e cânhamo. Segundo os autores, esse efeito está relacionado com a baixa densidade do material vegetal e a necessidade de maiores teores água para atingir a consistência correta para moldagem.

Ferreira et al. (2008) observaram o mesmo comportamento ao avaliarem os efeitos da adição da casca de arroz e casca de braquiária nas propriedades físico-mecânicas do tijolo solo-cimento. Os autores verificaram que a inserção de 40% de partículas vegetais (casca de arroz e braquiária) reduziu o valor de densidade aparente do tijolo, resultando em uma baixa ligação entre matriz/partícula.

Ao avaliarem os efeitos da inserção da casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas de tijolos solo-cimento, Milani & Freire (2006) concluíram que quanto maior a quantidade de casca adicionada na matriz, maior o volume de vazios encontrado no tijolo, resultando em uma baixa densidade do produto final.

Após o envelhecimento acelerado, houve redução dos valores médios da densidade aparente em comparação com os tijolos avaliados após 28 dias de cura. A maior redução pode ser observada no tratamento com adição de casca de café (5% em relação ao tijolo sem envelhecimento). Wei et al. (2016) explicam esse fato em decorrência do material de reforço afetar diretamente a hidratação do cimento, pois a casca de café apresenta a menor porcentagem de holocelulose e, conseqüentemente, a maior porcentagem de lignina e extrativos (Tabela 6). Segundo Teixeira et al. (2018), outro aspecto importante na redução da densidade do compósito,

está relacionado com a movimentação (absorção e secagem) das partículas dentro da matriz cimentícia, que provoca microfissuras durante o envelhecimento.

Com base nos resultados obtidos para o volume e massa específica dos tijolos, foi possível a determinação do grau de compactação (GC) dos tijolos para cada tratamento, que estão apresentados na Tabela 7. A faixa ideal para o grau de compactação deve estar entre 95% e 105% (BUERNO e VILAR, 1999). Dessa forma, somente os tijolos contendo partículas de pinus não atingiram a faixa ideal, entretanto, não há diferença significativa entre os tratamentos analisados. Isso significa que, no processo de fabricação dos tijolos, todos os tratamentos atingiram a compactação ideal.

Tabela 7 - Grau de compactação dos tijolos solo-cimento.

Tratamento	Grau de compactação
Controle	95,67 ^(2,75) A
Eucalipto	97,68 ^(1,21) A
Pinus	94,78 ^(2,60) A
Casca de café	96,93 ^(1,60) A
Bagaço de cana	98,93 ^(2,06) A

Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Valores de desvio padrão são fornecidos entre parênteses.

Os resultados obtidos para o grau de compactação corroboram com os valores da massa específica aparente seca máxima (Tabela 4), tendo em vista que, o GC é inversamente proporcional ao γ_d máx, ou seja, quanto menor a densidade básica das partículas vegetais (Tabela 6), menor será o γ_d máx e, conseqüentemente, maior o grau de compactação.

O ensaio de absorção de água foi realizado para cada tratamento antes e após o envelhecimento acelerado, essa propriedade afeta diretamente a durabilidade dos tijolos (BARBIERI et al., 2013). A Figura 7 apresenta os valores médios para cada tratamento. É possível observar que a absorção de água sofrida pelos tijolos envelhecidos, seguiu o mesmo padrão dos tijolos aos 28 dias de cura. Os tratamentos com inserção das partículas vegetais (eucalipto, pinus, casca de café e bagaço de cana) apresentaram aumento significativo em relação ao tratamento controle, com destaque para os tijolos produzidos com bagaço de cana, que resultaram em um aumento de aproximadamente 18% na absorção de água aos 28 dias de cura. Esse fato está relacionado com a baixa densidade das partículas do bagaço de cana, que resulta em maior quantidade de partículas nos tijolos reduzindo a densidade aparente do produto e, conseqüentemente, aumentando quantidade de poros na matriz.

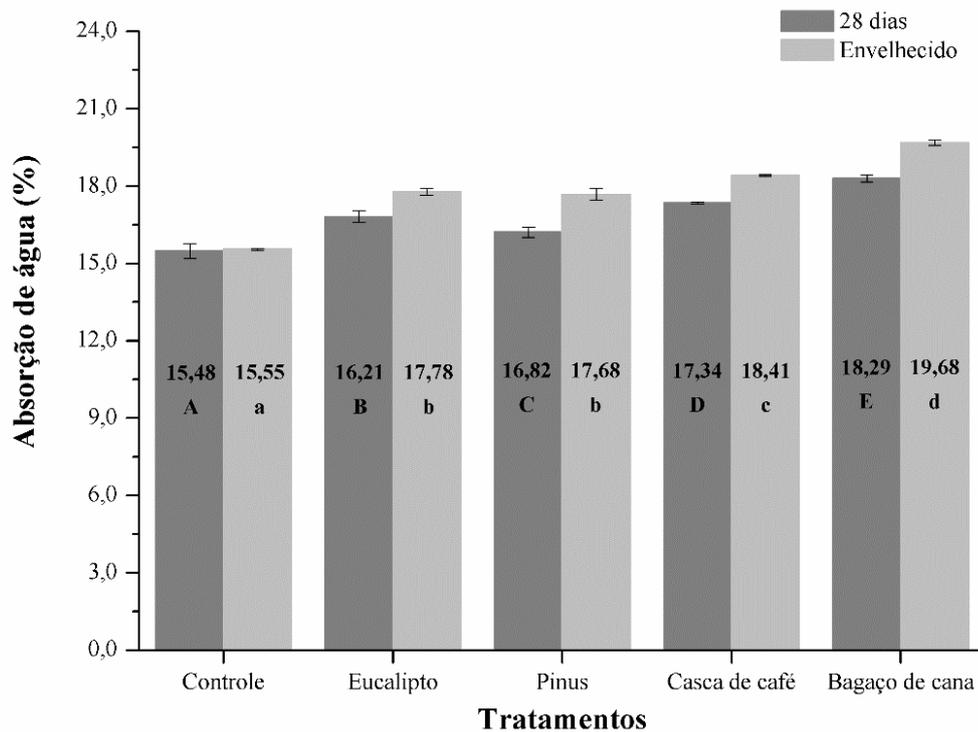


Figura 7 – Absorção de água dos tijolos solo-cimento aos 28 dias de cura e após envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra (maiúscula – 28 dias; minúscula – envelhecido) não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

A propriedade de absorção de água em tijolos solo-cimento está relacionada com a densificação e também com a matriz. Os valores de absorção de água dos diferentes tratamentos estão diretamente relacionados aos valores de γ_d máx, conforme pode ser verificado na Tabela 4, ou seja, quanto maior a massa específica aparente seca máxima, melhor será o empacotamento dos grãos nos tijolos, resultando em menores espaços vazios (poros), dificultando assim a penetração da água.

O aumento da absorção de água dos tijolos com adição de partículas vegetais, pode ser explicado pelo fato da higroscopicidade das partículas, além da baixa densidade das mesmas, que resultam na quantidade maior de partículas na mistura, dificultando o processo de compactação dos tijolos e, conseqüentemente, desenvolvimento de poros (TORKAMAN et al., 2014; WEI et al., 2019). Outro fator que influencia diretamente no acréscimo da absorção de água está relacionado com a presença de extrativos nas partículas vegetais, que pode promover a inibição da hidratação do cimento, acarretando o enfraquecimento da ligação partícula/matriz (Figura 8), tornando o compósito mais poroso e com maior absorção de água (CHAKRABORTY et al., 2013; CHECHIN et al., 2018).

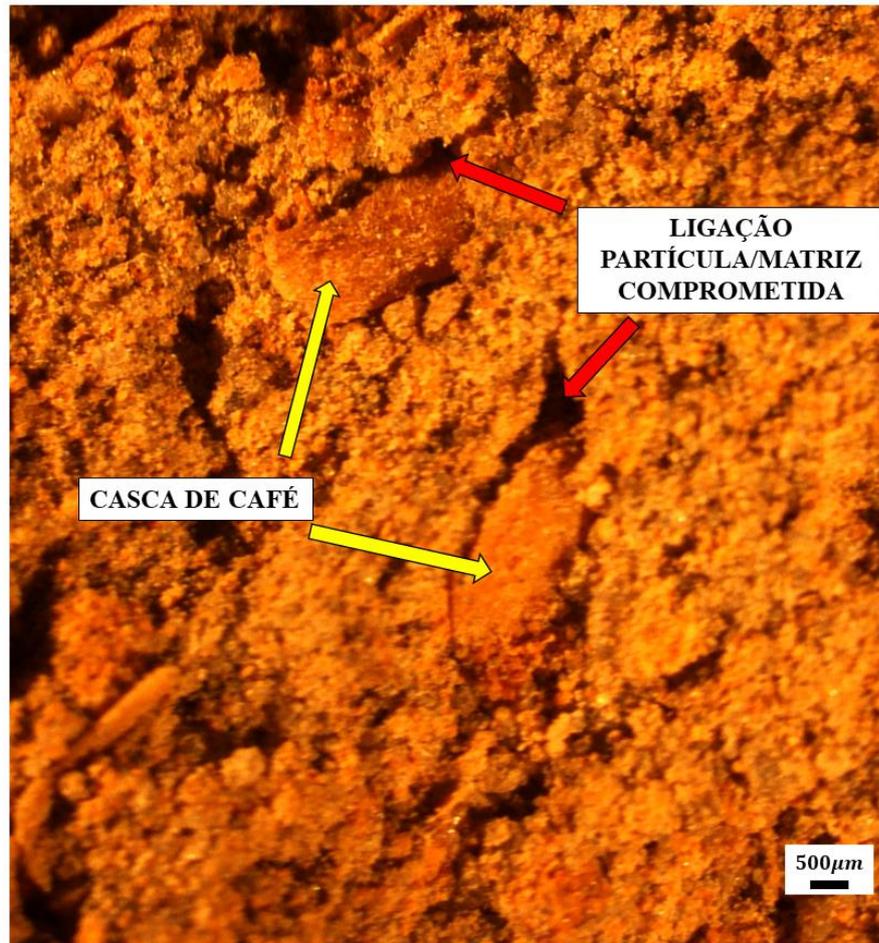


Figura 8 - Microscopia óptica do tijolo solo-cimento com partículas de casca de café, aos 28 dias de cura. Aumento de 10x.

Ferreira e Cunha (2017) avaliaram a qualidade técnica de tijolos solo-cimento produzidos com diferentes porcentagens (0, 10, 20, 30 e 40%, em massa) de resíduos da casca de arroz e brachiaria e concluíram que o incremento no teor de resíduos aumentou significativamente a absorção de água dos tijolos devido a menor densidade aparente das partículas, ocasionando menor densidade do tijolo e, conseqüentemente maior quantidade de poros na matriz.

Siqueira e Holanda (2013) estudaram a utilização do resíduo da indústria de celulose como matéria-prima para substituição do cimento *Portland* em até 30%, em peso, em tijolos solo-cimento. Os autores verificaram que acima de 20% de adição do resíduo, foi observado um aumento substancial na absorção de água do composto e relataram que essa propriedade está diretamente ligada à densidade aparente do tijolo.

Antes e após o envelhecimento, observa-se que os tratamentos com adição de partículas vegetais apresentaram diferença estatística entre eles, exceto para os tijolos com partículas de eucalipto e pinus, que não demonstraram diferença significativa, após os ciclos de

envelhecimento. Em comparação com o tratamento controle, o maior valor de absorção de água ocorreu para o tratamento com bagaço de cana, cerca de 27% de aumento, esse mesmo comportamento foi observado para os tijolos após 28 dias de cura. O acréscimo dos valores de absorção de água dos tijolos, antes e após o envelhecimento, pode ser justificado pelas microfissuras desenvolvidas durante o processo de umedecimento e secagem dos tijolos, onde ocorre uma alteração em seu volume (ARDANUY et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2018).

Dessa forma, todos os tratamentos analisados alcançaram valores médios inferiores ao valor máximo estipulado pela NBR 8492 (ABNT, 2012), que é de 20% para absorção de água. Alguns autores relatam interação entre as propriedades físicas e mecânicas de tijolos solo-cimento com a densidade aparente do mesmo, sendo que, quanto menor a quantidade de espaços vazios no compósito, melhor interação entre solo e cimento e, conseqüentemente, maiores valores de resistência (MILANI & FREIRE, 2006; SEKHAR & NAYAK, 2018). Sendo assim, com relação a propriedade física, absorção de água, o tijolo solo-cimento com inserção de partículas vegetais possui potencial para aplicação na construção civil.

Com relação à perda de massa por imersão, a Figura 9 apresenta os valores médios dos diferentes tratamentos aos 28 dias de cura e após o envelhecimento.

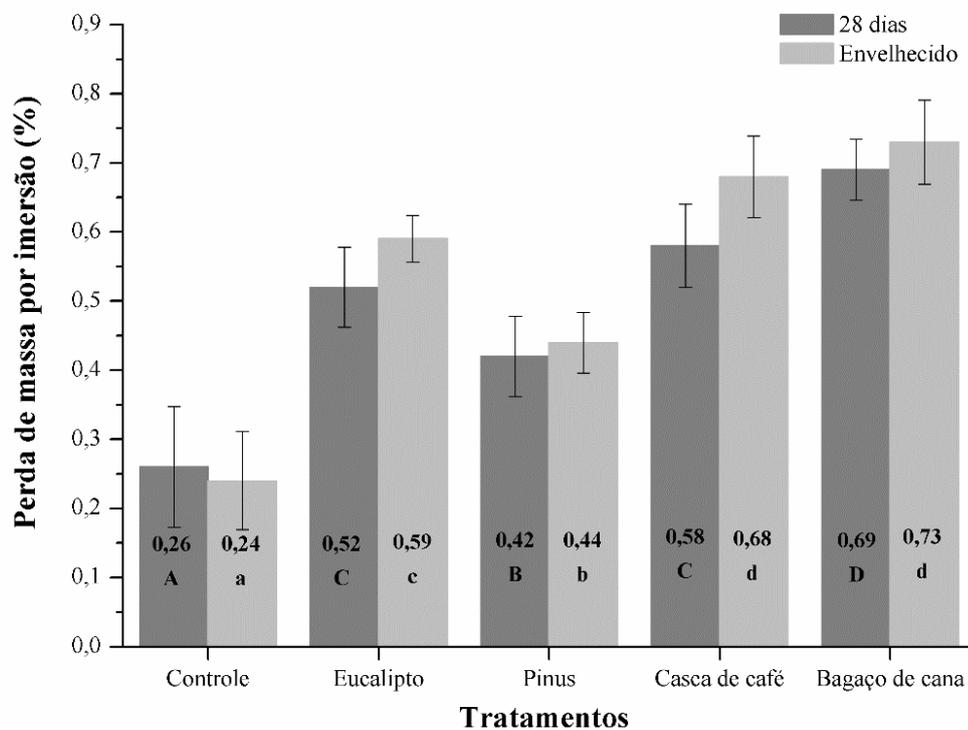


Figura 9 – Perda de massa por imersão dos tijolos solo-cimento aos 28 dias de cura e após envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra (maiúscula – 28 dias; minúscula – envelhecido) não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Houve efeito significativo do tipo de partícula vegetal sobre a perda de massa dos tijolos, antes e após o envelhecimento acelerado. O tratamento com inserção do bagaço de cana foi aquele que obteve os maiores valores de perda de massa, 0,69 e 0,73% aos 28 dias de cura e após o envelhecimento, respectivamente, diferenciando estatisticamente dos demais tratamentos. Em contrapartida, o tratamento controle (sem adição de partículas vegetais) apresentou os menores resultados, 0,26 e 0,24% antes e após o envelhecimento, respectivamente, apresentando diferença estatística em comparação com os tratamentos com partículas vegetais. A adição de partículas nos tijolos promoveu uma redução na densidade do compósito e, conseqüentemente baixa compactação (Tabela 4), resultando em uma fraca adesão partícula/matriz (Figura 10), fazendo com que o mesmo, quando em contato com a água, apresentasse perda dos seus componentes (JIN et al., 2018).

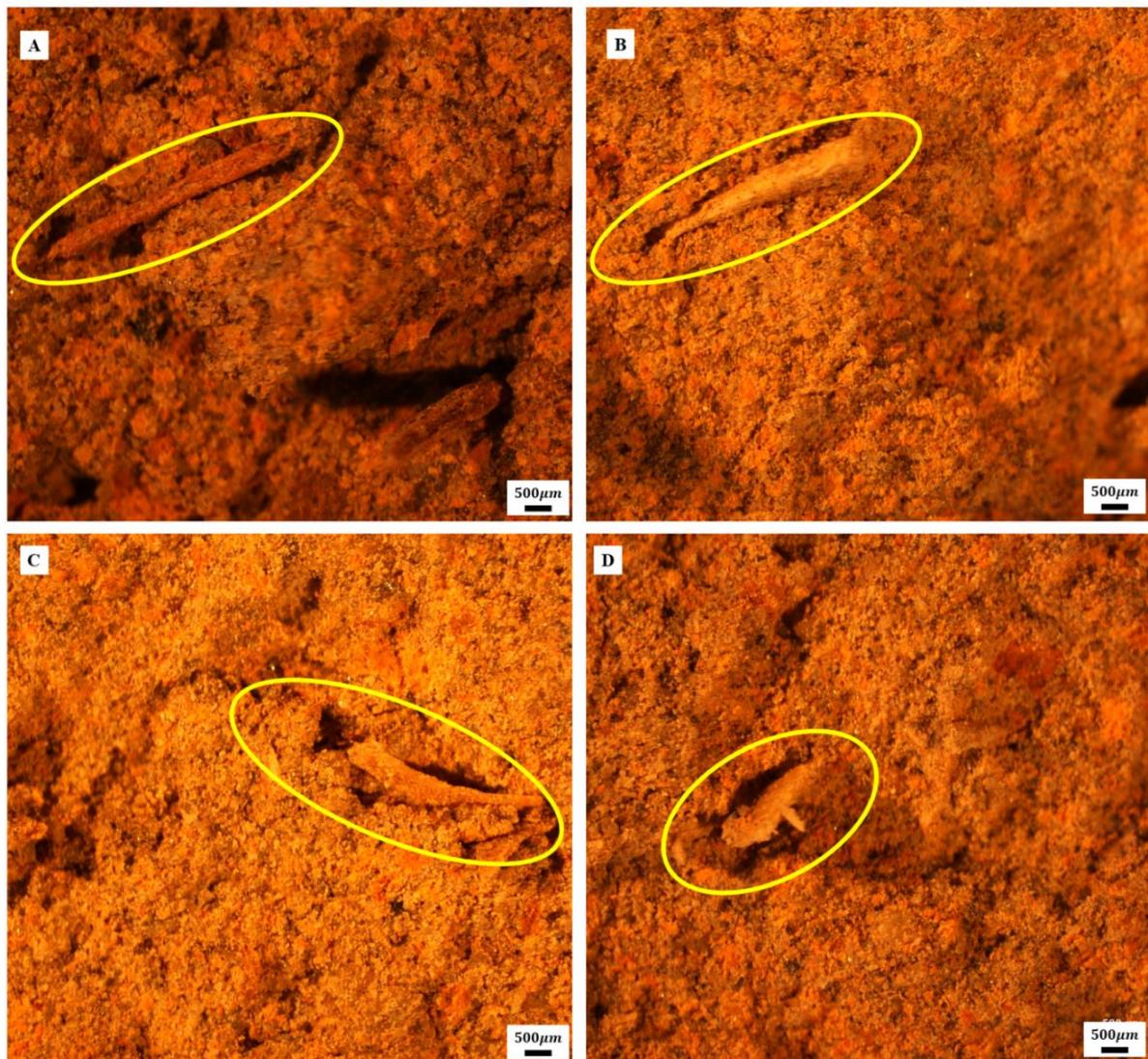


Figura 10 - Microscopia óptica do tijolo solo-cimento aos 28 dias de cura. (A) Partícula de eucalipto. (B) Partícula de pinus. (C) Partícula de casca de café. (D) Partícula de bagaço de cana. Aumento de 10x.

O aumento da perda de massa após o envelhecimento acelerado, para os tratamentos com inserção de partículas vegetais, está relacionado ao esfarelamento provocado pelos ciclos de molhagem e secagem dos tijolos, acarretando na redução da ligação dos seus componentes. De modo geral, os valores de perda de massa por imersão, antes e após o envelhecimento, demonstraram que as partículas vegetais, além de comprometerem a ligação partícula/matriz, aumenta consideravelmente a quantidade de material desprendida dos tijolos quando imersos em água. Entretanto, todos os tratamentos apresentaram uma perda de massa dentro dos padrões citados pela norma NBR 8492 (ABNT, 2012) que atribui uma perda máxima de massa para o tijolo de solo-cimento de 5%.

A resistência à compressão dos tijolos foi determinada aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado para cada tratamento estudado. Os valores médios bem como a análise estatística do ensaio de resistência à compressão podem ser observados na Figura 11.

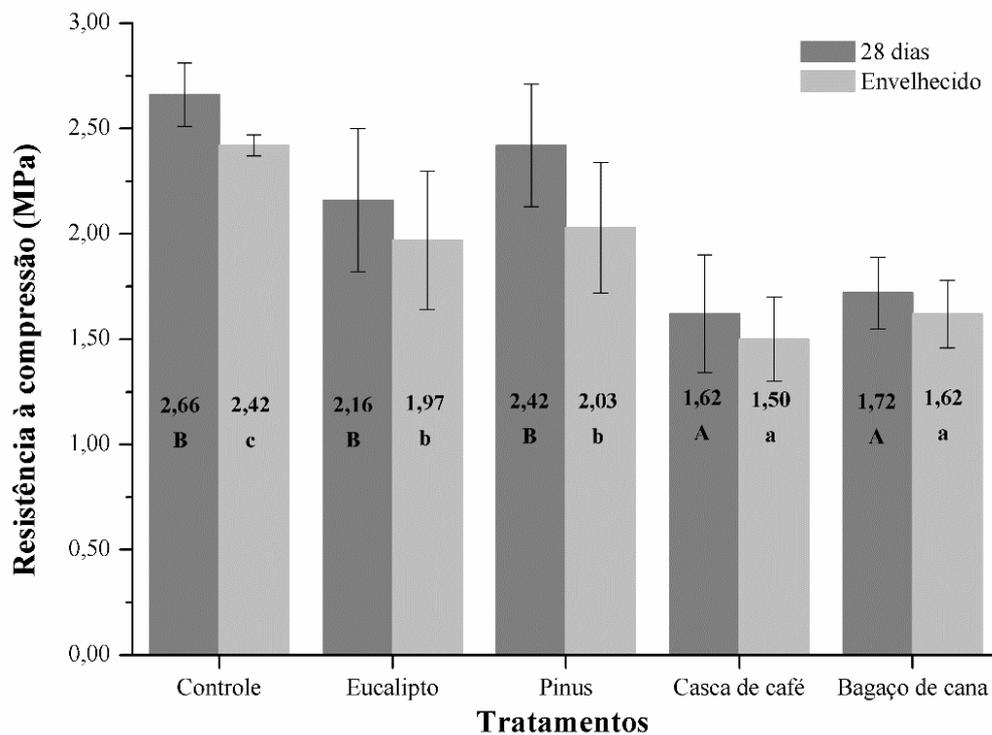


Figura 11 – Resistência à compressão dos tijolos solo-cimento aos 28 dias de cura e após envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra (maiúscula – 28 dias; minúscula – envelhecido) não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Observa-se pelos dados apresentados na Figura 11, aos 28 dias de cura, uma redução da resistência à compressão com inserção das partículas vegetais no tijolo solo-cimento, sendo os valores médios inferiores ao tratamento controle. Entretanto, cabe ressaltar que somente os tratamentos com partículas de casca de café e bagaço de cana diferiram estatisticamente dos

demais, apresentando uma redução da resistência de aproximadamente 40% (casca de café) e 35% (bagaço de cana) em comparação com os tijolos solo-cimento sem partículas vegetais.

Apesar de apresentar o grau de compactação dentro dos parâmetros estabelecidos (Tabela 7), o baixo valor da resistência dos tijolos com partículas de casca de café e bagaço de cana, pode ser explicado pela formação de poros na matriz (Figura 6) acarretando em maior absorção de água (Figura 7) e, conseqüentemente maior perda de massa do material (Figura 9). Outro principal fator na redução da propriedade mecânica, está relacionado a composição química da partícula vegetal (Tabela 6). Vale ressaltar que a presença de extrativos em matrizes cimentícias pode agir como inibidores iniciais da hidratação do cimento, aumentando o tempo de cura e reduzindo as propriedades do compósito (SELLAMI et al., 2013; CHAFEI et al., 2014; SILVEIRA et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2018).

Ferreira & Cunha (2017) incorporaram casca de arroz na produção de tijolos solo-cimento em substituição do cimento *Portland* em diversas porcentagens (0, 10, 20, 30 e 40%). Os autores observaram uma redução na resistência à compressão, de aproximadamente 66% para os tijolos produzidos com 40% de casca de arroz em relação ao tratamento controle (sem adição de partículas vegetais). Esse decréscimo está relacionado a fraca adesão entre as partículas e a matriz.

A menor diferença entre os tratamentos foi observada para os tijolos produzidos com partículas de pinus, no qual obteve uma redução de 9% em relação ao tratamento controle. O melhor desempenho do tratamento citado, em relação aos demais, está relacionado com o alto índice de esbeltez das partículas de pinus (Tabela 5) que aumenta a área de contato partícula/matriz e, conseqüentemente melhores valores das propriedades mecânicas (QUINTILIO et al., 2011; BALDIN et al., 2016; YOO et al., 2017).

Com relação a resistência à compressão dos tijolos após o envelhecimento acelerado, é notável o mesmo comportamento após 28 dias de cura, entretanto, houve nesse caso diferença significativa entre o tratamento controle e os demais tratamentos. O processo de envelhecimento dos tijolos solo-cimento é constituído por ciclos de umedecimento e secagem, dessa forma ocorrem alterações volumétricas do material que resultam em microfissuras e quebra das ligações na interface partícula/matriz, resultando em espaços vazios e na redução das propriedades mecânicas do tijolo (ARDANUY et al., 2012; SAWSEN et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2018). Comparando os tratamentos com a presença do material de reforço, os tijolos produzidos com partículas de pinus obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão, antes e após o envelhecimento, fato este justificado pela boa aderência entre partícula/matriz acarretando maior suporte de carga (Figura 12).

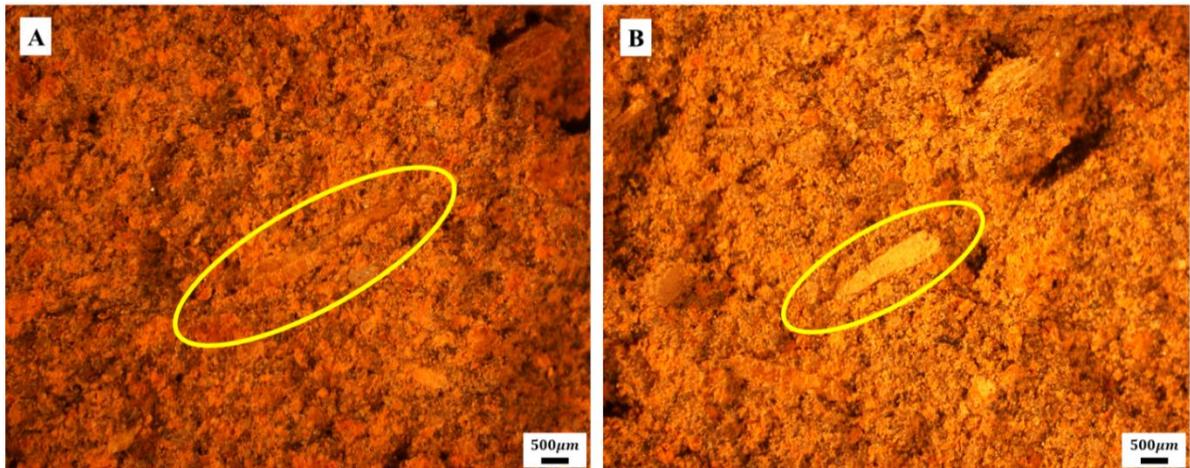


Figura 12 - Microscopia óptica do tijolo solo-cimento com partículas de pinus. (A) aos 28 dias de cura. (B) após envelhecimento acelerado. Aumento de 10x.

De acordo com a norma NBR 8492 (ABNT, 2012), o valor mínimo estipulado para resistência à compressão de tijolos solo-cimento deve ser de 2,0 MPa. Sendo assim, os tratamentos controle e com partículas de eucalipto e pinus, aos 28 dias de cura, se enquadram nos requisitos da norma de comercialização. Após o envelhecimento acelerado, o tratamento com inserção de partículas de Eucalipto apresentou valor de resistência próximo a 2 MPa, entretanto, a referida norma não apresenta valores mínimos de resistência à compressão após ciclos de envelhecimento. Dessa forma, tijolo solo-cimento se torna uma excelente matriz para o aproveitamento desses resíduos vegetais, levando em consideração o baixo custo da matéria-prima (partículas de Eucalipto e Pinus), alta disponibilidade, capacidade de redução da densidade final do tijolo, resultando em uma estrutura mais leve, conforme descrito por Naidu et al. (2017).

3.4 Caracterização térmica dos tijolos

Os valores médios para todos os tratamentos, antes e após o envelhecimento acelerado, estão apresentados na Figura 13.

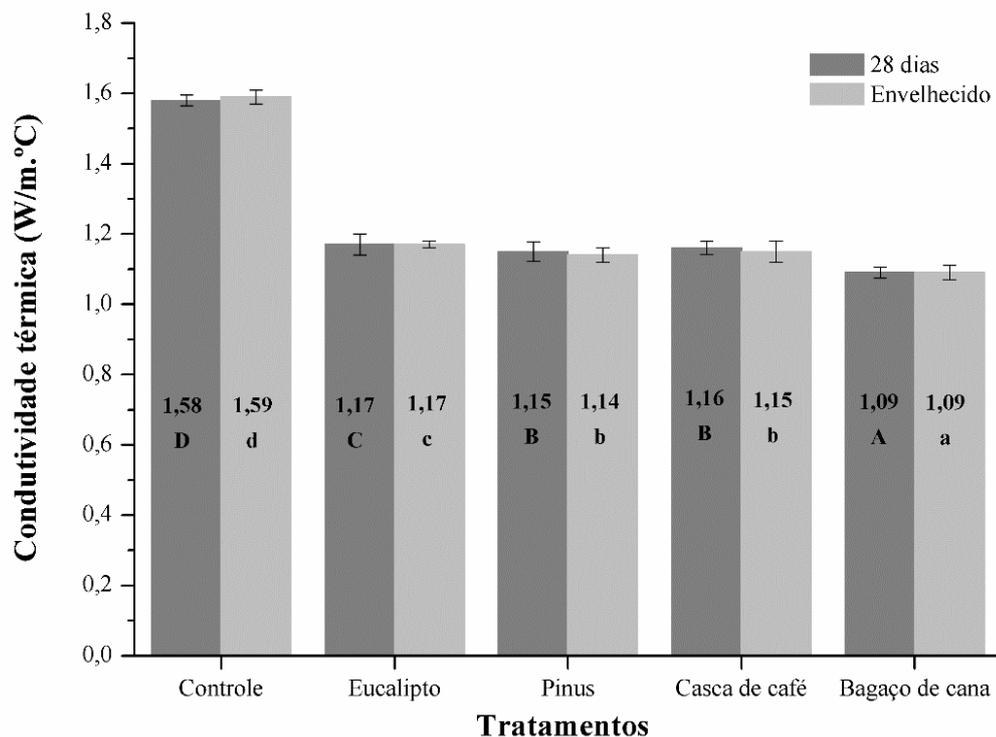


Figura 13 – Condutividade térmica dos tijolos solo-cimento aos 28 dias de cura e após envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra (maiúscula – 28 dias; minúscula – envelhecido) não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Pode-se observar diferença estatística em todos os tratamentos com adição de partículas vegetais, antes e após o envelhecimento acelerado. A inserção de partículas promoveu uma redução na condutividade térmica dos tijolos solo-cimento, com destaque para o tratamento com bagaço de cana, que obteve uma redução de aproximadamente 31% em comparação ao tratamento controle. Entretanto, a inserção das partículas de eucalipto e pinus nos tijolos contribuíram para uma redução da condutividade térmica de aproximadamente 26%, antes e após o envelhecimento, em comparação ao tratamento controle. Estes resultados estão diretamente relacionados com a densidade do tijolo (Figura 5) e, conseqüentemente com a quantidade de poros no material (Figura 6), sendo que, quanto menor a densidade do tijolo, maior a quantidade de espaços vazios, resultando em menor condutividade térmica (ASHOUR et al., 2015; BALAJI et al., 2017; RICKLEFS et al., 2017; LIU et al., 2019).

Laibi et al. (2018) estudaram o comportamento de blocos de terra comprimidos com fibras vegetais de Kenaf e encontraram uma redução significativa na condutividade térmica devido ao aumento da porosidade a medida que insere as fibras vegetais. Ashour et al. (2015) encontraram valores médios de condutividade térmica para tijolos com palha de trigo e cevada (3%), iguais a 0,310 W/m.°C e 0,314 W/m.°C respectivamente, concluindo que a adição das partículas vegetais interferem diretamente na propriedade térmica analisada.

Segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2003) de desempenho térmico de edificações, o valor de condutividade térmica para paredes externas, deve ser igual ou inferior a $2,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, apontando dessa forma, que todos os tratamentos avaliados apresentaram resultados positivos e consolidam que, os tijolos solo-cimento produzidos com partículas de eucalipto e pinus além de apresentarem propriedades físicas e mecânicas ideais, proporcionam um excelente isolamento térmico. Levando em consideração que o consumo energético para aquecer ou resfriar um ambiente é relativamente mais alto em edificações construídas com materiais que possuem baixo isolamento térmico (KHEDARI et al. 2005; GANDIA et al., 2019), as construções utilizando tijolo solo-cimento com inserção do resíduo de mineração e partículas vegetais apresentam menor gasto energético para manter o conforto térmico do ambiente.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho justificam que é possível melhorar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos tijolos solo-cimento fabricados com resíduo de mineração e partículas vegetais como material de reforço. A inserção das partículas de Eucalipto, Pinus, casca de café e bagaço de cana na produção de tijolos solo-cimento, para fins de vedação em edificações, resultaram em uma redução da densidade aparente do material, antes e após o envelhecimento acelerado, acarretando maior isolamento térmico. Vale ressaltar que as características físicas, químicas e geométricas do material de reforço tiveram influência direta sobre as propriedades dos tijolos, não podendo elas serem descartadas para fins de avaliação.

Correlacionando todas as propriedades analisadas, observou-se que os tratamentos com inserção de pinus e eucalipto atenderam a todos os critérios das normas de comercialização, além de apresentar redução da densidade e melhoria do isolamento térmico. Dessa forma, a utilização dos resíduos de mineração e resíduos agrícolas na produção de compósito a base de cimento acarretam, além da melhoria das propriedades física, mecânica e térmica do produto, uma disponibilização de matérias-primas alternativas e destinação adequada do resíduo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Financiamento à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. Disponível em:

http://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao___rodoviaria___hrb.pdf
Acesso em novembro/2018.

Ardanuy, M., et al.: Nanofibrillated cellulose (nfc) as a potential reinforcement for high performance cement mortar composites. **Bio Resources** 7, 3883–3894 (2012).

Ashour, T. et al. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. **Energy and Buildings** 104 (2015) 139–146.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais, **Boletim Técnico BT 111**, São Paulo, (1985).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). ABCP. **Guia de construções rurais à base de cimento**. São Paulo – SP, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). ABCP. Dosagens das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo: ABCP. (2004) 63. (**ET-35**).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**. Métodos De Cálculo Da Transmitância Térmica, Da Capacidade Térmica, Do Atraso Térmico De Elementos E Componentes De Edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica. Rio de Janeiro: ABNT, 2012, versão corrigida: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Densidade básica da madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira – Determinação do material solúvel em etanol, tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Versão corrigida: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Versão corrigida: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro: 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro: 2012.

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

AZWA, Z. N. et al. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibers. **Materials and Design, Birmingham**, v. 47, n.1, p. 424-442.

BALAJI, N. C. et al. Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks.

Construction Materials 170 February 2017 Issue CM1. Pages 40–54

<http://dx.doi.org/10.1680/jcoma.15.00032>

BALDIN, T. et al. Qualidade de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e capim-annoni. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.11, n.3, p.230-237, 2016.

BARBIERI, L.; ANDREOLA, F.; LANCELLOTTI, I.; TAURINO, R. Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks. **Waste Management** 33 (2013) 2307–2315.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.014>.

BILBA, K.; ARSENE, M.; OUENSANGA, A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cem Concr Compos** 2003; 25:91–6.

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari: CEPED, 1984. 116p.

CHAFEI, S. et al. Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, 54:59-64, 2014.

CHAKRABORTY, S. et al. Effect of jute as fiber reinforcement controlling the hydration characteristics of cement matrix. **Ind. Eng. Chem. Res**, v. 53, p. 1252–1260, 2013.

CHECHIN, L. et al. Effect of adding blast furnace slag to composites with mosso bamboo. **Matéria**, v.23, n.4, 2018.

DJELLOUL, R.; MRABENT, S. A. B.; HACHICHI, A.; FLEUREAU, J. M. Effect of Cement on the Drying–Wetting Paths and on Some Engineering Properties of a Compacted Natural Clay from Oran, Algeria. **Geotech Geol Eng** (2018) 36:995–1010.
<https://doi.org/10.1007/s10706-017-0370-1>

FARIA, K. C. P; GURGEL, R. F; HOLANDA, J. N. F. Reciclagem de resíduos de cinzas do bagaço de cana na produção de tijolos de barro. **Journal of Environmental Management**, v.101, p.7-12, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.032>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Desperdiço de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade**. Disponível em: <http://www.fao.org.br/dacatb.asp>. Acesso em: 31 de maio de 2017.

FRATINI, F.; PECCHIONI, E.; ROVERO, L.; TONIETTI, U. The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): characterization for restoration, **Appl. Clay Sci.** 53 (3) (2011) 509–516.

FERREIRA, R. C.; CUNHA, A. H. N. Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.21, n.8, p.543-549, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p543-549>

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

FERREIRA, S. R. et al. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction & Building Materials**, v. 139, p. 551-561, 2016.

GANDIA, R. M. et al. Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. **Construction and Building Materials** 222 (2019) 168–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>

GANGA, G.; NSONGO, T.; ELENGA, H.; MABIALA, B.; TATSIETE, T. T. Efeito da incorporação de cavacos e mogno do pó de madeira no comportamento mecânico e acústico

da argila de tijolo. **Journal of Building Construction and Planning Research**, v.2, p.198-208, 2014. <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2014.23018>

GRAM, H. Durability of natural fibres in concrete. Stockolm: **Swedish Cement and Concrete Research Institute**; 1983.

HUANG, X. et al. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials** 44 (2013) 757–764. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.088>

IZQUIERDO, I. S. et al. Sisal fiber reinforced hollow concrete blocks for structural applications: Testing and modelling. **Construction & Building Materials**, v. 151, p. 98-112, 2017.

JAMES, J. et al. Cement stabilized soil blocks admixed with sugarcane bagasse ash. **J. Eng.** (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/7940239>.

JIN, L.; SONG W.; SHU X.; HUANG B. Use of water reducer to enhance the mechanical and durability properties of cement-treated soil. **Construction and Building Materials** 159 (2018) 690–694.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. Design and investigation of sustainable pozzolanic material. **Journal of Cleaner Production** 242 (2020) 1184312.

KHEDARI, J.; WATSNASATHAOIRN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. **Cement & Concrete Composites**, Kidlington, v.27, n.1, p.111-16, 2005.

LAIBI, A. B. et al. Sohounhloué, Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB), **J. Civ. Eng.** 22 (2) (2018) 785–793. ISSN: 1934-7359.

LARUCCIA, M. M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **ENIAC Pesquisa**, Guarulhos (SP), p. 69-84, v. 3, n. 1, jan.-jun. 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.22567/rep.v3i1.124>

LEONEL, R. F. et al. Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. **Cerâmica** 63 (2017) 329-335. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672131>

LIU, Z. Y. et al. Thermal conductivity and mechanical properties of a shape-stabilized paraffin/recycled cement paste phase change energy storage composite incorporated into inorganic cementitious materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 99, p. 165-174, 2019.

MADURWAR, M. V; RALEGAONKAR, R. V; MANDAVGANE, S. A. Aplicação de resíduos agrícolas a materiais de construção sustentáveis: uma revisão. **Materiais de Construção e Construção**, v.38, p.872-878, 2013. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.01

MÉTODOS DE ENSAIO DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS COM EQUIPAMENTO MINIATURA. Recife, 2003. Vol 12/**ME-61**

MILANI, A. P. 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.

MOSLEMI A. A.; GARCIA, J.F.; HOFSTRAND, A.D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement water systems. **Wood and Fiber science**, v. 15, n.2, p. 164-176, USA; 1983.

MUNTOHAR, A. S. Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. **Construction and Building Materials** 25 (2011) 4215–4220. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061

NACIF, G. L. et al. Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 2, p. 259-268, (2013).

NAVAS, C. S.; REBOREDP, M. M., GRANADOS, D. L. Comparative Study of Agroindustrial Wastes for their use in Polymer Matrix Composites. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 778-785, 2015.

QUINTILIO, P.; QUAGLIARINI, E.; LENCI, S. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, p. 2067–2075, 2011.

RICKLEFS, A. et al. Thermal conductivity of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 104, p. 71-82, 2017.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica** 59 (2013) 551-556.

SANTOS, D. D. et al. Mechanical Properties and Seismic Performance of Wood-Concrete Composite Blocks for Building Construction. **Materials**, v. 12, 2019.

SAVASTANO, H.; SANTOS, S.; RADONJIC, M.; SOBOYEJO, W. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. **Cem Concr Compos.** 2009; 31:232–43

SAVASTANO, H.; WARDEN, P.; COUTTS, R. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cem Concr Compos.** 2000; 22:379–84.

SAWSEN, C. et al. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of cement composite. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 79, p. 229-235, Mar. 2015.

- SEDAN D, PAGNOUX C, SMITH A, CHOTARD T. Mechanical properties of hemp fibre-reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. **J Eur Ceram** 2008; 28:183–92.
- SEKHAR, D. C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials** 166 (2018) 531–536, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
- SELLAMI, A.; MERZOUD, M.; AMZIANE, S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. **Construction and Building Materials**, 47(11):17-24, 2013.
- SILVA, F. L. et al. Recycling of Concentration Tailings of Iron Ore for the Production of Concrete Block (Pavers). **Materials Science Forum**. v. 775-776, p. 631-634, 2014.
- SIQUEIRA F. B. et al. Effect of incorporation of grits waste on the densification behavior of soil-cement bricks. **Cerâmica** 61 (2015) 414-419. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613601917>
- SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. **Journal of Environmental Management**. v. 131, p.1-6, DEZ/2013.
- SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.205–212, 2007.
- STANCATO, A.; BURKE, A.; BERALDO, A. Mechanism of a vegetable waste compositewith polymer-modified cement (VWCPMC). **Cem Concr Compos** 2005; 27:599–603
- TEIXEIRA, J. N. et al. Lignocellulosic Materials for Fiber Cement Production. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-8, 2018.
- TEIXEIRA, R.S. et al. Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 450-457, 2012.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibers: A review. **Construction and Building Materials**. Guildford, v. 25; n. 2, p. 575-581, 2011.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral commodity summaries 2019**. U.S. Geological Survey, 204 p.88-89, 2019.
- VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. **In: Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, p.195-241, 2008.
- WEI, J., MA, S., THOMAS, D.G. Correlation between hydration of cement and durability of natural fibre-reinforced cement composites. **Corros. Sci.** 106, 1–15 (2016).

XUAN, D. X.; POON, C.S.; ZHENG, W. Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: a review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, p. 238–247, 2018.

YOO, D.Y., et al.: Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. **Compos. Struct.** 174, 375–388 (2017).

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