

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE.
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO.
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE.

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TIJOLOS DE SOLO-
CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Autora: Nájela Kamilla Paula Dantas
Orientador: Dr. Wesley Renato Viali
Coorientadora: Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali

Rio Verde – GO
Abril - 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE.
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO.
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE.

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TIJOLOS DE SOLO-
CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Autora: Nájela Kamilla Paula Dantas
Orientador: Dr. Wesley Renato Viali
Coorientadora: Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Tecnologia e Ciência dos Materiais.

Rio Verde – GO
Abril – 2020

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

D192e Dantas, Nájela Kamilla Paula
Estudo do Comportamento de Tijolos de Solo-Cimento com Substituição de Solo por Resíduos da Construção Civil/ Nájela Kamilla Paula Dantas; orientador Wesley Renato Viali; coorientadora Eloiza da Silva Nunes Viali. Rio Verde, 2020.
79 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) - Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. reciclagem. 2. resíduos. 3. Materiais de construção. 4. desenvolvimento sustentável. I. Renato Viali, Wesley, orient. II. da Silva Nunes Viali, Eloíza, coorient. Título.



Repositório Institucional do IF Goiano - RIIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Nájela Kamilla Paula Dantas

Matrícula: 2018102331440071

Título do Trabalho: Estudo do Comportamento de Tijolos de Solo-Cimento com substituição de Solo por Resíduos da Construção Civil.

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 18/06//2020

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde -GO, 18, junho de 2020.

Nájela Kamilla Paula Dantas

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Wesley Renato Viali

Assinatura do(a) orientador(a)

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE.
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO.
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE.

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TIJOLOS DE SOLO-
CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Autora: Nájela Kamilla Paula Dantas
Orientador: Dr. Wesley Renato Viali
Coorientadora: Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade – Área
de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADA em 22 de abril de 2020.


Prof. Dr. João Victor Fazzan

Avaliador externo

IFSP / Ilha Solteira


Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis

Avaliador interno

IF Goiano / Rio Verde


Prof. Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali

Presidente da Banca

IF Goiano / Rio Verde

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela proteção, sabedoria e por todas as oportunidades que me concede na vida. Em vários momentos, pensei desistir, mas ele esteve presente em todos eles, acalmando meu coração e dando forças para continuar;

Aos meus pais Raimundo e Maria Aparecida e à minha irmã Iara Karine, que sempre apoiaram meus sonhos. É por eles e para eles que eu busco o meu melhor todos os dias;

Ao Franklin, pelo companheirismo, paciência e por dividir comigo as aflições e os sorrisos que sempre me animam;

À minha orientadora, Dra. Eloíza da Silva Nunes Viali, e aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, que sempre estiveram à disposição para esclarecer minhas dúvidas e compartilhar seus conhecimentos;

Aos meus colegas de mestrado, que dividiram comigo os momentos de preocupações e alegrias. Em especial, à minha amiga Taline, pelas palavras de incentivo e por estar sempre disposta a me ajudar;

Aos alunos Henrique Juliemilly e Weliton, ao técnico Wainer e ao professor Eduardo Severino, pela disponibilidade na condução dos experimentos;

Aos técnicos de laboratório Igor e Jessyka e aos professores Victor e Fausto da Universidade de Rio Verde (UNIRV), pela contribuição com a pesquisa;

À empresa Eco Faber, Gilenge pré-moldados, e RNV Resíduos, por colaborarem com a pesquisa; e

Ao diretor de pesquisa e Pós-Graduação, Alan Carlos da Costa, e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, por proporcionarem a oportunidade de cursar o mestrado - meu muito obrigada.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Natural da cidade de Arenópolis–GO, filha de Raimundo Pinheiro Dantas e Maria Aparecida Paula dos Santos Dantas. Graduada em 2018 em Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde (IFGOIANO). Em 2018, fez especialização em Engenharia de Estruturas em Concreto, pela Faculdade Unyleya. Em 2018, iniciou atividade profissional na área de formação em uma construtora, permanecendo até o momento. Em 2018, ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Em abril de 2020, defendeu sua dissertação, parte indispensável para a obtenção do título de Mestre.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. SOLO.....	17
2.1.1. O Solo como Material de Construção.....	19
2.1.2. Estabilização dos Solos.....	20
2.2. SOLO-CIMENTO	21
2.2.1. Critérios para escolha do solo.....	23
2.2.2. Tijolos de Solo-cimento.....	24
2.3. RECICLAGEM	27
2.4. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	28
2.4.1. Resíduo cerâmico.....	30
2.4.2. Resíduo de concreto.....	32
3 OBJETIVOS	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1. MATERIAIS	35
4.1.1 Solo	35
4.1.2. Cimento.....	36
4.1.3. Resíduos da construção civil.....	36
4.1.4. Equipamentos de laboratório	36
4.2. MÉTODOS	37

5 CAPÍTULO I	45
RESUMO.....	45
ABSTRACT.....	46
5.1 INTRODUÇÃO	47
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
5.2.1. Caracterização dos Materiais da Mistura de Solo-Cimento.....	51
5.2.2. Definição das dosagens das misturas de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil.....	52
5.2.3. Mistura e moldagem dos corpos de prova	54
5.2.4. Ensaio das propriedades mecânicas	57
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.3.1 Caracterização Física dos Materiais	60
5.3.1.1 <i>Análise granulométrica</i>	60
5.3.1.2. <i>Limites de consistência</i>	61
5.3.1.3. <i>Compactação do solo</i>	63
5.3.2. Caracterização Mecânica dos materiais	64
5.3.2.1. <i>Resistência a compressão</i>	64
5.3.2.1. <i>Absorção de água e durabilidade</i>	69
5.4 CONCLUSÕES	71
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
6 CONCLUSÃO GERAL	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Dosagem em porcentagem dos materiais utilizados na composição do solo-cimento	39
Tabela 2: Consumos e proporções dos materiais constituintes do tijolo de solo-cimento ...	52
Tabela 3: Dosagem em porcentagem dos materiais utilizados na composição do solo-cimento	54
Tabela 4: Consumo de materiais para os traços de tijolos de solo-cimento	54
Tabela 5: Valores mínimos de resistência à compressão e à absorção de água de tijolos de solo-cimento para utilização em sistema de vedação	57
Tabela 6: Análise granulométrica das misturas solo-resíduos.....	61
Tabela 7: Limites de consistência.....	62
Tabela 8: Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do solo e mistura solo-resíduos	63
Tabela 9: Durabilidade dos tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Formação do solo	17
Figura 2: Esquema de uma amostra de solo: elemento de solo natural	18
Figura 3: Formas de estabilização do solo.....	21
Figura 4: Características de solo que são mais adequados para a estabilização	22
Figura 5: Formas de prensagem dos tijolos de solo-cimento (a) prensagem manual e (b) prensagem mecânica	25
Figura 6: Composição dos resíduos da construção civil.....	29
Figura 7: Resíduos (a) resíduos de construção civil após a coleta em caçambas e (b) resíduo de construção civil triturado	30
Figura 8: Tijolos cerâmicos triturados.....	31
Figura 9: Resíduo de concreto triturado	32
Figura 10: a) Empresa que fabrica artefatos de concreto e b) Resíduos de concreto sem e com beneficiamento.....	33

CAPÍTULO I

Figura 1: Materiais utilizados na mistura solo-cimento-resíduo	50
Figura 2: Resíduos de construção civil: (a) Resíduos mistos; (b) Resíduos de concreto; (c) Resíduos cerâmicos.....	51
Figura 3: Ensaio de caracterização física do solo e das misturas solo-resíduo: (a) limites de consistência, (b) compactação e (c) e (d) composição granulométrica.	52
Figura 4: Tijolos de solo-cimento com 60% de substituição de solo por resíduo cerâmico.	53
Figura 5: Solo e misturas solo-resíduos	55
Figura 6: Teste empírico para determinação da umidade ótima do solo	56

Figura 7: Equipamentos para fabricação dos tijolos de solo-cimento: (a) prensa hidráulica e (b) misturador e esteira mecânica	56
Figura 8: Ensaio de resistência à compressão mecânica: (a) e (b) tijolos preparados e serrados ao meio, (c) ligação das duas partes com pasta de cimento, (d) capeamento das duas faces e (e) rompimento dos tijolos.....	58
Figura 9: Resistência média dos tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos.	65
Figura 10: Relação A/C para os tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos	67
Figura 11: Absorção de água para os tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos	69

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / sigla	Significado	Unidade Medida
°C	Graus celsius	
%	Por cento	
ρ	Massa específica	kg/cm ³
A	Teor de absorção de água	%
ABRECON	Associação Brasileira Para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil E Demolição	
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland	
A/C	Relação água/cimento	
APUD	Em	
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente	
CP	Cimento Portland	
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	
CO ₂	Dióxido de Carbono	
<i>et al.</i>	E outros (as)	
Eq.	Equação	
IF	Instituto Federal	
kg	Quilograma	
kg / hab / dia	Quilograma por habitante por dia	

kg / cm ³	Quilograma por centímetro cúbico	
LL	Limite de liquidez	
LP	Limite de plasticidade	
IP	Índice de plasticidade	
GO	Goiás	
MPa	Mega pascal	
mm	Milímetro	
cm	Centímetro	
<i>m</i>	Massa	kg
m ³	Metro cúbico	
m / s	Metro por segundo	
n°	Número	
NBR	Norma brasileira	
NM	Norma mercosul	
ONG	Organização não governamental	
ONU	Organização das Nações Unidas	
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente	
PCA	<i>Portland Cement Association</i>	
<i>P_m</i>	Perda de massa	
RCC	Resíduos da construção civil	
RSU	Resíduos sólidos urbanos	
SSC	Solo-cimento compactado	
SSP	Solo-cimento plástico	
SP	São Paulo	
UNIRV	Universidade de Rio Verde	
V	Volume	m ³
<i>W_{ot}</i>	Umidade ótima	%

RESUMO

DANTAS, NÁJELA KAMILLA PAULA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, abril de 2020. **Estudo do Comportamento mecânico de Tijolos de Solo-Cimento com Substituição de Solo por Resíduos da Construção Civil**. Orientador: Dr. Wesley Renato Viali e Coorientadora: Dr^a Eloíza da Silva Nunes Viali.

A preocupação com a sustentabilidade e a tendência de escassez dos recursos naturais têm levado ao desenvolvimento de novos materiais, métodos ou processos de produção que minimizam os impactos negativos ao meio ambiente. Os resíduos de uso da construção estão entre os mais degradadores do meio ambiente, sendo importante seu reaproveitamento. Uma alternativa é sua incorporação na fabricação de tijolos de solo-cimento. Há uma carência de estudos que abranjam a influência das características dos diferentes tipos de resíduos da construção civil na confecção de tijolos de solo-cimento, sendo eles na forma como são recolhidos em caçambas de obras, resíduos mistos e resíduos da construção civil isolados, caso de resíduos de concreto e material cerâmico. Neste trabalho, são apresentados resultados de ensaios de laboratório, através dos quais se objetivou avaliar a possibilidade e a influência da substituição de solo por três tipos diferentes de resíduos da construção, resíduo de concreto, de materiais cerâmicos e mistos, na confecção de tijolos prensados de solo-cimento. Foram estudadas porcentagens de 20% e 40% de resíduos em relação à massa de solo. O teor de cimento foi fixado para todas as composições estudadas em 10% em relação à mistura solo-resíduo. Foram feitos ensaios de caracterização física do solo e das misturas de solo-resíduo. Para a confecção dos tijolos vazados de solo-cimento, utilizou-se prensa hidráulica. As propriedades mecânicas dos tijolos foram avaliadas por meio do ensaio de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade aos 28 dias de idade. Conforme os resultados dos ensaios, verificou-se que as substituições de solo pelos três tipos de resíduos proporcionaram melhoria nas propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cimento. Todas as composições solo-resíduos estudadas atenderam os requisitos normativos para confecção de

tijolos utilizados em sistema de vedação. A separação dos resíduos de construção civil não beneficiou o comportamento mecânico dos tijolos de solo-cimento. Entre os três tipos de resíduos estudados, o resíduo misto foi o mais viável, pois utiliza maior quantidade de materiais de descarte na sua composição e menos processos envolvidos para obtenção de melhores resultados. O reaproveitamento de resíduos diminui o volume descartado na natureza e proporciona a obtenção de tijolos de melhor qualidade.

PALAVRAS-CHAVE: reciclagem, resíduos, materiais de construção, desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

DANTAS, NÁJELA KAMILLA PAULA. Federal Institute of Goiás - Rio Verde Campus - GO, April 2020. **Study of the Mechanical Behavior of Soil-Cement Bricks with Substitution of Soil by Construction Waste**. Advisor: Dr. Wesley Renato Viali and Co-advisor: Dra. Eloíza da Silva Nunes Viali.

The concern with sustainability and the tendency of scarcity of natural resources undergo the development of new materials, methods or production processes that minimize the negative effects on the environment. Construction waste is among the most degrading of the environment, and it is important to either reuse it. An alternative is the incorporation in the manufacture of cement bricks on the ground. There is a lack of studies that cover the influence of the characteristics of the different types of construction waste in the making of cement bricks, as they are collected in construction dumps, waste mixtures and construction waste, as is the case of concrete and ceramic material waste. In this work, the results of laboratory tests are presented, which aim to evaluate the possibility and the influence of the substitution of soil by three different types of construction waste, concrete waste, ceramic materials and mixtures in the manufacture of pressed bricks of soil-cement. Percentages of 20% and 40% of residues in relation to the soil mass were studied. The cement content was fixed for all studied compositions at 10% in relation to the soil-residue mixture. Tests of physical characterization of the soil and mixtures of soil residue were carried out. For the manufacture of hollow soil-cement bricks, use the hydraulic press. As the mechanical properties of the bricks were evaluated through the test of resistance to absorption, water absorption and resistance at 28 days of age. According to the results of the tests carried out, it was found that as replacements of soil by the three types of residues, they provided improvements in the mechanical properties of soil-cement bricks. All studied soil-waste compositions meet the normative requirements for making bricks used in the sealing system. The separation of construction waste did not benefit the mechanical behavior of soil-cement

bricks. Among the three types of waste studied, the mixed waste proves to be the most viable, as it uses a greater amount of disposal materials in its composition and less processes involved in the best results. The reuse of waste reduces the volume discarded in nature and provides the best quality brick waste.

KEYWORDS: recycling, waste, building materials, sustainable development.

1 INTRODUÇÃO

Os tijolos de solo-cimento resultam da mistura homogênea de solo, cimento e água, compactada por prensagem, em prensa manual ou hidráulica, curada à sombra (ABNT, 2013). São conhecidos como tijolos ecológicos por dispensarem a queima, processo que libera CO_2 no ambiente, caso dos tijolos cerâmicos convencionais (SENA et al., 2017). Além disso, no seu processo de fabricação, poucos resíduos são gerados, os equipamentos são simples, não sendo necessária mão de obra especializada. Proporcionam redução dos custos da obra, do tempo de execução e melhoram o isolamento térmico e acústico.

Os tijolos de solo-cimento podem ser utilizados como matrizes para incorporação de resíduos, diminuindo o volume descartado na natureza, proporcionando a obtenção de tijolos de melhor qualidade.

A sustentabilidade das atividades econômicas é extremamente importante para a proteção do meio ambiente e desenvolvimento da sociedade. A reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos se destacam como alternativas alinhadas a esses novos conceitos de desenvolvimento sustentável.

Em razão da disponibilidade limitada de recursos naturais e do rápido crescimento econômico no mundo, a sociedade tornou-se excessivamente consumista de recursos naturais. Há um déficit de materiais de construção extraídos de fontes renováveis não poluentes. A maioria dos materiais utilizados gera uma grande quantidade de resíduo, poluindo o ar, a água e o solo. No contexto ambiental, a preocupação com o meio ambiente e a tendência de escassez dos recursos naturais têm levado a sociedade a buscar o desenvolvimento de novos conceitos e técnicas de crescimento sustentável que minimizem os impactos negativos gerados ao meio ambiente.

Grande parte dos impactos ambientais é causada pelo descarte inadequado de resíduos, que exigem áreas extensas e apropriadas para sua disposição. Os resíduos da indústria da

construção civil, segundo Blumenschein e Sposto (2013), estão entre os mais degradadores do meio ambiente. Este setor gera uma grande quantidade de resíduos poluentes que, na maioria das vezes, são depositados em locais inadequados.

De acordo com Segantini e Wada (2011), 50% de todos os resíduos encontrados no mundo são oriundos do setor da construção civil, sendo que em cada obra 30% dos materiais são desperdiçados. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019) relata que no Brasil são gerados 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos e deste total 45 milhões de toneladas são constituídas por resíduos da construção civil (RCC).

Neste contexto, a sustentabilidade das atividades econômicas é extremamente importante para a proteção do meio ambiente e desenvolvimento da sociedade. A reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos se destacam como alternativas alinhadas a esses novos conceitos de desenvolvimento sustentável.

Os fatores apresentados motivaram o estudo dos resíduos da construção civil incorporados em tijolos de solo-cimento como uma alternativa prática para redução dos problemas causados por esses materiais de descarte e ainda avaliar o comportamento mecânico dos tijolos de solo-cimento com substituição de parte do solo por esses resíduos.

Os RCC são constituídos por qualquer tipo de material descartado em obra, sendo, portanto, uma mistura bastante variável, dependendo das técnicas construtivas e dos materiais aplicados na obra. A grande maioria desses resíduos é composta, segundo Segantini e Wada (2011), por restos de argamassa, concreto e materiais cerâmicos, que podem ser reaproveitados e transformados em matéria-prima para o uso dentro da própria indústria da construção civil, de modo a reduzir os impactos gerados ao meio ambiente e a minimizar os problemas futuros relacionados ao esgotamento dos recursos naturais.

A diversidade de resíduos no setor da construção civil permite reutilizá-los de diversas maneiras e contribuir com melhorias em várias propriedades dos materiais. Ali et al. (2016) observaram que tijolos de solo-cimento contendo resíduo de material cerâmico apresentam maior resistência à compressão, em comparação com a dosagem sem resíduo. Souza et al. (2008) também observaram que a utilização de resíduos de concreto em matriz de solo-cimento reduz a utilização de cimento na mistura em 6% e melhora positivamente as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos. Reis (2018) estudou a utilização de resíduos mistos de construção civil, tendo obtido ótimos resultados nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos de solo-cimento na medida em que era aumentada a quantidade de resíduo à massa do solo.

Os RCC, por terem características distintas, influenciam propriedades diferentes quando acrescentados na mistura solo-cimento para confecção de tijolos. Resíduos de concreto e cerâmicos podem ser encontrados facilmente nas caçambas de entulhos, porém, na maioria das vezes, não há uma separação correta de ambos os resíduos, sendo encontrados misturados com outros materiais. Poucos estudos têm sido feitos comparando a eficiência dos resíduos puros, sem mistura, com aqueles encontrados misturados nas caçambas de entulhos.

Isto posto, pela carência de estudos relacionados com as propriedades que os tijolos de solo-cimento podem apresentar com a substituição de solo por diferentes tipos de resíduo da construção civil, foi desenvolvido este trabalho, que analisou tijolos de solo-cimento com substituição de parte do solo por resíduos mistos, recolhidos em caçambas sem a separação adequada, e resíduos de concreto e material cerâmico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Solo

O solo é a formação natural constituinte da parte superficial da crosta terrestre, de estrutura solta e removível e de espessura variável, resultante da transformação de uma rocha pela influência de diversos processos físicos, químicos e biológicos. As partículas resultantes deste processo de intemperismo irão depender fundamentalmente da composição da rocha matriz e do clima da região (Figura 1) (SILVA, 2015).

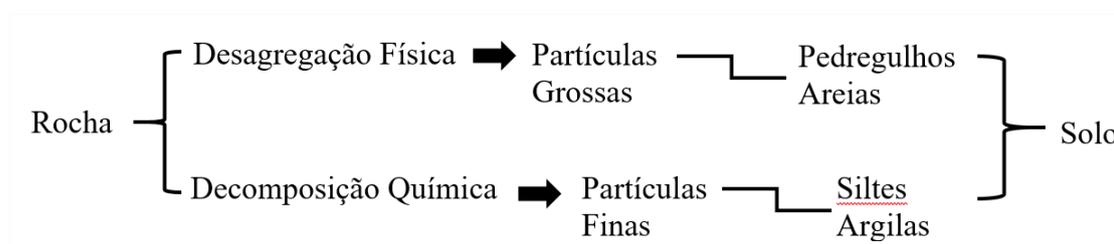


Figura 1: Formação do solo
Fonte: Adaptado de Santiago (2001).

Os solos podem ser divididos em dois tipos: residual, quando o solo permanece no mesmo lugar de sua formação, ou sedimentar (transportado), aquele que, após sua formação, é removido da superfície da rocha matriz por ação de um agente transportador (SANTIAGO, 2001).

Por ser produto da decomposição das rochas, o solo apresenta um maior índice de vazios do que a rocha mãe, vazios estes ocupados por ar, água ou outro fluido de natureza diversa (Figura 2). Os solos se constituem, desta forma, de quatro grandes componentes: material mineral, material orgânico, água e ar. Os constituintes minerais (inorgânicos) dos solos geralmente são constituídos de pequenos fragmentos de rocha e ainda de vários tipos de minerais. O ar encontrado no solo não é contínuo e se encontra em poros separados, e a matéria orgânica existentes se encontra em estado coloidal e controla, na maioria das vezes, as propriedades físicas e químicas do solo (REDDY E LATHA, 2013; SANTIAGO, 2001).

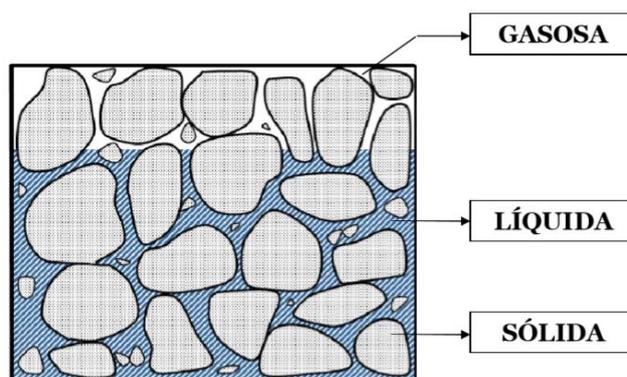


Figura 2: Esquema de uma amostra de solo: elemento de solo natural
Fonte: Silva (2015).

Para Silva (2015), a água presente na constituição dos solos pode ser encontrada nas formas de água livre, aquela que envolve as partículas e é eliminada a temperatura ambiente; água de combinação, aquela mais próxima à superfície dos minerais; água adsorvida, presente em finas camadas presas a superfície do mineral por forças de atração; e água estrutural, aquela que faz parte do retículo cristalino de alguns minerais.

Os constituintes minerais que são a parte sólida do solo são divididos em inertes, conhecidos como fração grossa, e argilo-minerais, que conferem plasticidade e coesão ao solo, sendo quimicamente ativos (REDDY E LATHA, 2013).

O solo pode ser dividido em frações de acordo com o tamanho e a forma das partículas de seus constituintes. De acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), os pedregulhos têm seus diâmetros superiores a 4,8mm e as areias têm o diâmetro de seus grãos entre 0,05 e 2,0mm. Os solos finos podem ser divididos em: siltes, com pouca ou nenhuma plasticidade, com

grãos de tamanho entre 0,05 e 0,005mm, e argilas, agregados de partículas microscópicas, com grãos menores que 0,005mm. A granulometria do solo e a configuração dos diversos tamanhos das suas partículas determinam seu comportamento mecânico.

2.1.1. O Solo como Material de Construção

O uso do solo como material de construção é muito antigo. Inúmeras criações de eras passadas são testemunho da história e da cultura dos povos. A dificuldade de manuseio de pedra e da madeira fez com que o homem primitivo construísse abrigos eficientes contra as hostilidades do meio ambiente utilizando o solo como principal matéria-prima (SOUZA et.al, 2008).

No Brasil, o solo teve seu emprego generalizado até o século XVIII, com maior ênfase em locais onde não havia muita pedra. A utilização do solo como material de construção foi iniciada pelos exploradores portugueses (SANTIAGO, 2001). O solo teve e ainda tem seu uso bastante difundido no globo terrestre, tendo sido detectadas inúmeras formas de utilizar este material.

O solo pode ser utilizado como material básico para alguns elementos construtivos. Pode ser aproveitado, segundo Estabragh et al. (2020), como solo natural, que não é submetido ao processo de queima, ou como material cerâmico, que é o solo quando passa pelo processo de queima, o que requer como matéria-prima uma argila arenosa rica em componentes sílico-aluminosos, que serão transformados quando levados a alta temperatura.

Para a escolha da técnica de construção com solo adequada, é necessário o conhecimento da composição do solo, de suas propriedades e de seu comportamento, ou seja, da composição granulométrica, plasticidade, retração, umidade e compactação, entre outras (SILVA, 2015).

Conforme Reis (2018), as construções com emprego do solo apresentam elevado conforto térmico, bom comportamento acústico, economia energética, relacionada à produção e ao transporte do material, e ainda a possibilidade de reciclagem. Outro ponto muito importante é a capacidade de os materiais, utilizando o solo como material base, receberem resíduos de outros processos construtivos, sem comprometimento de sua qualidade, podendo ainda melhorar suas propriedades mecânicas.

Desse modo, o conhecimento das técnicas do uso do solo como material de construção é importante por representar não só uma redução considerável de custos se comparado com os materiais de uso corrente hoje em dia, mas também por questões ambientais.

2.1.2. Estabilização dos Solos

A estabilização dos solos é um processo que confere ao solo maior resistência, podendo ser alcançada pela compactação, correção de sua granulometria e de sua plasticidade, ou pela adição de substâncias que ofereçam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de seus grãos (SILVA, 2015).

Segundo Hidalgo et al. (2019), as estabilizações dos solos tendem a conferir ao produto final melhor estabilidade dimensional, aumento da resistência mecânica, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração por retração por secagem, resistência à erosão e à abrasão superficial e, com isso, aumento da durabilidade do material.

Hidalgo et al. (2019) explicam que a estabilização favorece o preenchimento e a redução do volume de vazios, influenciando a porosidade e a permeabilidade do solo, além de melhorar a aderência entre grãos, conferindo maior densidade ao solo, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas.

De acordo com Estabragh et al. (2020), a melhoria de um solo pode ser alcançada com a estabilização através dos diferentes processos existentes. Os principais tipos são a mecânica, granulométrica, química, elétrica e térmica (Figura 3).

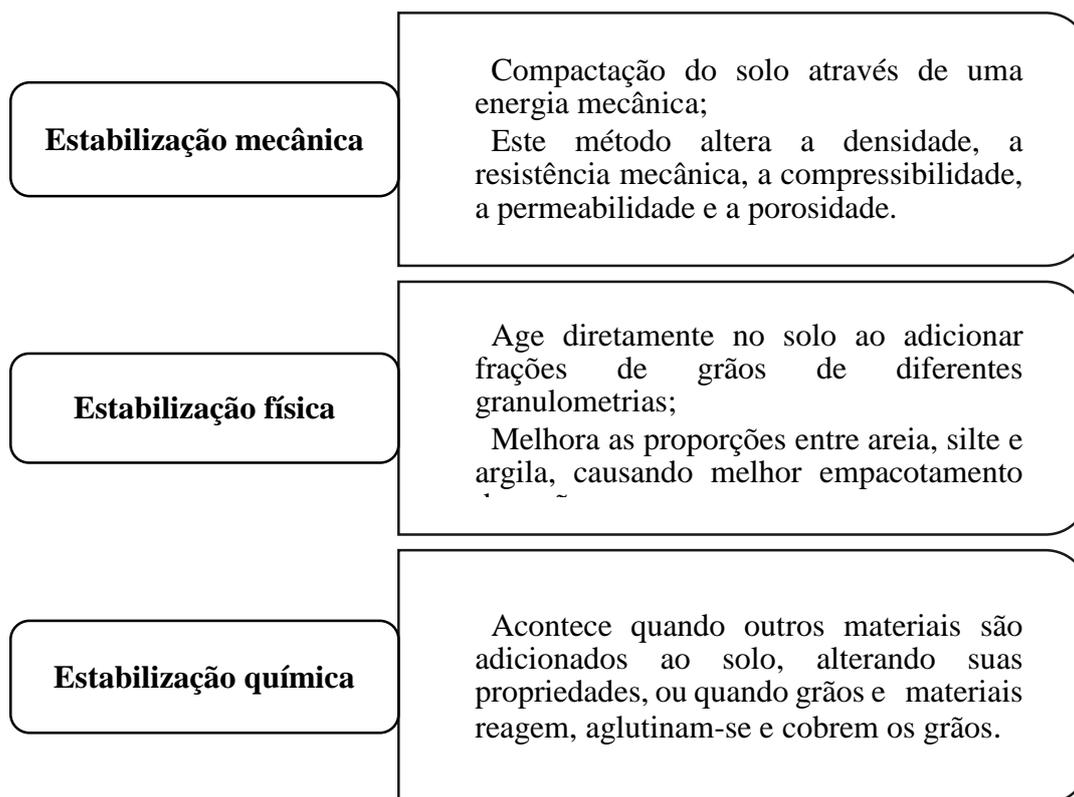


Figura 3: Formas de estabilização do solo
 Fonte: Adaptado de Silva (2015).

2.2. Solo-Cimento

Segundo a ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland (2004), o solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções previamente estabelecidas através de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo. O material resultante deste processo apresenta boa resistência à compressão, boa impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. Essas características são alcançadas pelas reações de hidratação do cimento.

O solo-cimento pode ser classificado em dois grupos: SCC, solo-cimento compactado; e SCP, solo-cimento plástico. No caso do SCC, a água deve ser adicionada em quantidade suficiente na umidade ótima do solo de modo a possibilitar máxima compactação e ocorrência das reações de hidratação do cimento. Para o caso do SCP, a água deve ser adicionada até a obtenção de um produto de consistência plástica (ESTABRAGH et al., 2020).

Os principais fatores que influenciam na qualidade do solo-cimento são o tipo de solo, teor de cimento, método de mistura e tempo de compactação. Outros fatores como cura, densidade adequada, homogeneização da mistura do solo com o cimento também podem influenciar na resistência do solo estabilizado (ESTABRAGH et al., 2020).

De maneira geral, para a ABCP (2016), o tipo do solo é o fator que exerce maior influência na qualidade do produto, e a NBR 10833 (ABNT, 2013) recomenda que os mais adequados para a estabilização com cimento são os mencionados na Figura 4.

A dosagem de solo-cimento consiste na fixação de três variáveis: quantidade de cimento, quantidade de água e massa específica aparente seca máxima. Entretanto, as duas últimas variáveis são parâmetros sujeitos a oscilações em função das variações que ocorrem nas características do solo, passando assim a ser tomadas como elemento de controle do serviço. Desta forma, o objetivo principal da dosagem é a fixação da quantidade adequada de cimento (ABCP, 2004).

O solo deve ser selecionado de modo a possibilitar o uso da menor quantidade possível de cimento. Segundo a NBR 12253 (2016), o cimento representa uma quantidade que varia entre 5% e 10% da massa do solo, sendo suficiente para promover a estabilização e conferir as propriedades de resistência desejadas, sendo que as variações no teor de cimento ocorrem pela vasta diversidade de solos existentes.

	100% PASSANDO PELA PENEIRA 4,75 mm (N° 4);
SOLO	10% A 50% PASSANDO PELA PENEIRA 0,075 mm (N° 200);
	LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) MENOR OU IGUAL A 45%;
	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP) MENOR OU IGUAL A 18%.

Figura 4: Características de solo que são mais adequados para a estabilização
Fonte: Adaptado de ABCP (2016).

Outro fator relacionado ao tipo de solo é o teor de matéria orgânica, que tende a reduzir a resistência do solo-cimento. A NBR 10833 (ABNT, 2013) recomenda que o solo

não tenha matéria orgânica em quantidade tal que prejudique a hidratação do cimento. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009) (Agregados para concreto – especificação), não é recomendado ultrapassar 10% da massa do agregado.

2.2.1. Critérios para escolha do solo

Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, devendo ser selecionado de modo a permitir o menor consumo possível de cimento e a garantir propriedades satisfatórias para a mistura.

Para a escolha do solo, devem ser observadas suas propriedades físicas como os indicativos de qualidade cor, textura, granulometria e plasticidade. Para os melhores resultados, a estabilização com o cimento e o processo de compactação dos solos são essenciais (ESTABRAGH et al., 2020).

Quase todos os solos podem ser estabilizados com cimento, sendo que alguns necessitam de baixas quantidades de aglomerantes, tornando o processo mais viável economicamente.

Segundo a ABCP (2004), a composição granulométrica é determinante na estabilização do solo-cimento, traçando parâmetros que correlacionam teores de cimento com viabilidade econômica de sua aplicação. Para Estabragh et al. (2020), quando há uniformidade na granulometria da areia e os teores de silte e de argila são elevados, faz-se necessário o uso de um alto teor de cimento, aumentando, assim, o custo da mistura.

A estabilização do solo com o cimento é adequada para aqueles que têm areia de granulometria grosseira e minerais argilosos não expansivos (REDDY E LATHA, 2013). Segundo a ABCP (2016), os solos arenosos requerem, quase sempre, menores quantidades de cimento do que os argilosos e siltosos. À medida que se aumenta o teor de argila no solo, aumenta-se a necessidade de consumo do cimento para estabilização.

Segundo Souza et al. (2008), o solo propício para a confecção de tijolos de solo-cimento deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, sendo os solos arenosos bem graduados e com razoável quantidade de silte mais argila os mais indicados por exigirem baixo consumo de cimento.

Segundo a ABCP (2004), em geral, para fins de pavimentação, podem ser empregados solos com as seguintes características: grãos com diâmetro máximo de 75 mm;

50% dos grãos passando na peneira n°4 (4,8 mm); de 15 a 100% dos grãos passando na peneira de n°40 (0,42 mm); menos de 50% dos grãos passando na peneira n°200 (0,075 mm); limite de liquidez (LL) \leq 40%; e índice de plasticidade (IP) \leq 18%.

No entanto, para a mistura de solo-cimento, os solos devem ter também um teor mínimo da fração fina, composto por cerca de 20 % de silte e argila. Estudos como o de Estabragh et al., (2020) demonstraram que essa parcela é necessária para dar coesão suficiente à mistura solo-cimento.

Os solos com baixa fração de argila e fração cascalho/areia alta são mais adequados para a estabilização do solo com o cimento. A fração de argila de 10% e 14% produz uma mistura com máxima resistência e boas características de durabilidade (REDDY E LATHA, 2013). A existência de areia grossa e pedregulho é favorável, pois são materiais inertes com função apenas de enchimento, favorecendo a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores.

Para Fraga et al. (2016), é aconselhável utilizar um solo que contenha 10% a 20% de argila, 10% a 20% de silte e 50% a 70% de areia.

Já para “PCA - Portland Cement Association” (1969 apud SEGANTINI e WADA, 2011), os solos mais apropriados para a fabricação de tijolos de solo-cimento devem ter quantidades de areia entre 45 e 50%.

De maneira geral, o solo utilizado para a mistura solo-cimento deve ter uma parcela de areia para adequada estabilização com o cimento e também uma parcela de fração fina, composta por argila e silte, responsável pela coesão da mistura quando umedecida e compactada.

Para a fabricação de tijolos de solo-cimento, a NBR 10833 (ABNT, 2013) recomenda apenas que o solo utilizado na mistura seja constituído das propriedades mencionadas na Figura 4.

2.2.2. Tijolos de Solo-cimento

Os tijolos de solo-cimento resultam da mistura homogênea de solo, cimento e água, compactada por prensagem, em prensa manual ou hidráulica, e curada à sombra. Constituem uma das alternativas para diversas aplicações na construção de alvenaria, tendo, após o

período de cura, resistência à compressão simples similar à dos tijolos cerâmicos NBR 10833 (ABNT, 2013).

O processo de fabricação dos tijolos é bastante simples, sendo iniciado com a peneiração dos materiais que compõem a mistura solo-cimento. Depois, deve-se proceder à sua homogeneização, adicionando água aos poucos. Em seguida, é feita a moldagem dos tijolos com prensa manual ou hidráulica (Figura 5), colocando-os em local plano e coberto para receber cura úmida por meio de molhagem sucessiva durante os 7 primeiros dias.

Os tijolos de solo-cimento representam uma alternativa em sintonia com o desenvolvimento sustentável, sendo alguns dos motivos o baixo consumo de energia na extração da matéria-prima, pois dispensam o processo de queima e reduzem a necessidade de transporte, uma vez que os tijolos podem ser produzidos com solo do próprio local da fabricação.

Um outro aspecto é a possibilidade de racionalização do processo construtivo, pois tijolos quebrados podem ser reaproveitados, moídos e prensados novamente, proporcionando redução de desperdícios e diminuição do volume de entulho gerado. Além disso, para a fabricação dos tijolos, os equipamentos são simples, não havendo necessidade de mão de obra especializada (SEGANTINI E WADA, 2011).



Figura 5: Formas de prensagem dos tijolos de solo-cimento (a) prensagem manual e (b) prensagem mecânica

Fonte: A autora.

A qualidade e o aspecto final das peças são visivelmente bons, com regularidade dimensional e com suas faces planas, propiciando menor consumo de argamassa de assentamento e de revestimentos. Há ainda a possibilidade de o tijolo de solo-cimento ser

empregado em alvenaria aparente, necessitando apenas de uma pintura impermeável para seu acabamento (SENA et al., 2017).

Além das vantagens econômicas, o tijolo de solo-cimento é ambientalmente sustentável por dispensar a queima em fornalhas, processo que libera CO_2 no ambiente, caso dos tijolos cerâmicos convencionais (SENA et al., 2017).

Diversas pesquisas têm sido conduzidas com a finalidade de reduzir o custo do solo-cimento, adicionando diversos tipos de resíduos na substituição do cimento ou do solo.

Quando os resíduos são incorporados à mistura solo-cimento para substituição do cimento, o material deve conter atividades pozolânicas. Já para quando os resíduos substituem o solo na mistura, a principal função é a de corrigir a granulometria do solo.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), materiais pozolânicos são materiais silicosos que apresentam pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem como o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes, como é o exemplo do cimento.

Alguns estudos mostraram a eficiência da substituição parcial de cimento por cinzas de casca de arroz, cinza volante, entre outros resíduos. Estas adições minerais têm alguma quantidade de sílica e alumínio que, na presença de água, promovem uma reação pozolânica (REIS, 2018).

Pesquisa conduzida por Dallacort (2002) permitiu concluir que substituições de 25 e 57% de cimento por material cerâmico podem produzir blocos de solo-cimento com resistências superiores a 2 MPa, com teor de material ligante de 6 e 8%.

Segantini e Wada (2011) estudaram a substituição do solo por resíduos de construção civil em proporções de 20, 40, 60, 80 e 100% na mistura solo-cimento, tendo observado que o solo-cimento é uma excelente matriz para o aproveitamento dos resíduos, sem prejuízo para a qualidade do produto final.

Uma outra pesquisa desenvolvida por Silva et al. (2013) substituiu o solo por resíduos cerâmicos na mistura solo-cimento, demonstrando melhores resultados nas propriedades mecânicas dos tijolos em relação àqueles que não tinham resíduos na sua composição. Souza et al. (2008) utilizaram teores de substituição do solo por 20, 40 e 60% de resíduos de concreto na composição do solo-cimento, obtendo resistências mecânicas satisfatórias para tijolos utilizados em sistemas de vedação, demonstrando ser uma excelente alternativa para aproveitamento deste material.

Outro material que pode ser incorporado na mistura solo-cimento são as cinzas da queima de biomassa. Estudo de Giorgi et al. (2018) mostrou a potencialidade de cinzas do

bagaço de cana-de-açúcar na mistura solo-cimento para fabricação de tijolos, comprovando que a cinza proporcionou maior durabilidade e aumento nas propriedades mecânicas de blocos de solo compactado.

Desta forma, há diversas possibilidades de incorporação de resíduos para uso em matrizes de solo-cimento, trazendo benefícios ao meio ambiente, utilizando um material antes descartável para formulação de um novo material de vedação.

2.3. Reciclagem

Com a intensa industrialização, os RCC se transformaram em graves problemas urbanos, demandando constantemente seu reaproveitamento. Para tanto, são utilizadas estratégias como a reciclagem, que transforma o resíduo para diversas aplicações, não necessitando de um processo para ser reutilizado. Já o beneficiamento é o ato de submeter o resíduo a operações e/ou a processos para ter condições de ser utilizado como matéria-prima ou produto (CONAMA, 2002).

Para Souza et al. (2008), quando os RCC são reciclados, eles geram benefícios como redução no consumo de recursos naturais não renováveis, redução de áreas necessárias para aterro, diminuição da poluição gerada pelo entulho e de suas consequências negativas como enchentes e assoreamento de rios e córregos e preservação das reservas naturais de matérias-primas.

A escassez de áreas para a deposição dos resíduos, em decorrência de uma ocupação desordenada, torna o gerenciamento oneroso e complexo (NAGALLI, 2014). A maioria dos resíduos é depositada em aterros clandestinos, obstruindo córregos e sistemas de drenagem, causando enchentes que favorecem acúmulo de água e proliferação de doenças (SOUZA et al., 2008).

O reaproveitamento dos RCC é fundamental, visto representarem cerca de 70% de todos os resíduos sólidos nas cidades brasileiras, sendo reciclados somente 46% (ABRECON, 2015). A construção civil tem grande potencial para o aproveitamento dos resíduos, uma vez que nela são consumidos cerca 75% de recursos naturais (NAGALLI, 2014).

De acordo com a Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002), o gerador de RCC deve garantir que eles sejam acondicionados após a geração até a etapa do transporte,

assegurando que estejam em condições de serem reaproveitados. No entanto, para Ângulo e Figueiredo (2016), apesar do grande potencial, apenas 25 % dos RCC são reutilizados ou reciclados.

Desta forma, os materiais descartados pelas obras de construção civil são verdadeiros depósitos de matérias-primas, passíveis de serem exploradas. O reaproveitamento dos RCC torna-se viável desde que ocorra inicialmente sua separação no próprio canteiro de obra para garantir a pureza dos materiais, ou seja, ausência de contaminação por produtos como óleos, tintas ou substâncias diversas. Para tal, são empregadas técnicas de processamento como trituração e moagem, peneiramento, separação dos materiais ferrosos e classificação.

2.4. Resíduos da construção civil

A geração de resíduos pela indústria da construção civil é um problema atual em todos os países do mundo, havendo, em muitos deles, leis ambientais severas estabelecendo a implementação de medidas para a efetiva disposição e gerenciamento destes rejeitos.

Segundo a Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os resíduos da construção civil são:

“os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliças ou metralha” (BRASIL, 2002).

A construção civil é um dos principais setores que contribuem para o crescente aumento da geração de resíduos sólidos no país. Segundo Nagalli (2014), esses resíduos representam de 13 a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tanto no Brasil como no exterior, cerca de duas vezes maior que o volume de lixo sólido urbano, sendo esses

resíduos da construção civil potencialmente recicláveis, podendo ser reutilizados em inúmeras aplicações dentro do próprio setor.

A composição dos resíduos da construção civil, segundo Souza et al. (2008), é diferente em cada obra em razão da diversidade de tecnologias utilizadas no setor. As múltiplas atividades desenvolvidas dentro do canteiro de obras resultam em um resíduo composto por inúmeros tipos de materiais, que dependem da fonte que o originou.

Silva et al. (2013) apontam que 40 a 70% de resíduos urbanos vêm da construção e que os materiais descartados em locais de construção são compostos por 64% de argamassa, 30% de componentes utilizados na vedação (tijolos, telhas e blocos cerâmicos) e 6% de outros materiais (betão, pedras, areia e materiais metálicos).

Para Hernandez e Vilar (2004), a maior parte dos resíduos da construção civil é composta de concreto e argamassa, resultado do sistema construtivo brasileiro utilizado. De maneira geral, os RCC são compostos por 53% de concreto e argamassa, 22% de solo e areia, 14% de componentes cerâmicos, 5% de rochas, 4% de plásticos e por 2% de outros materiais (Figuras 6).

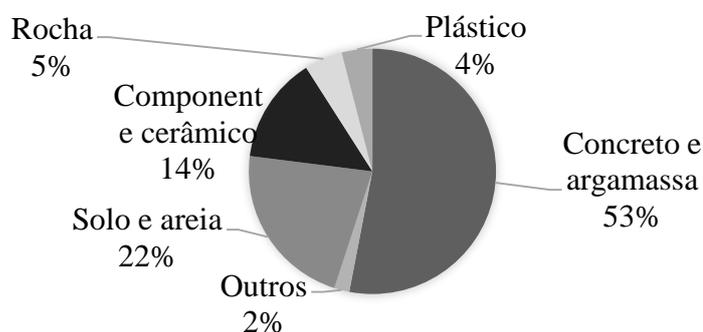


Figura 6: Composição dos resíduos da construção civil.
Fonte: Hernandez e Vilar (2004).

Os resíduos de canteiros de obras são provenientes de materiais básicos de qualidade. Quando esses resíduos são triturados, eles se assemelham a uma areia grossa de construção (Figura 7). Conforme Reis (2018), a maior parte da sua composição se origina de restos de concretos, argamassas, materiais cerâmicos, solos e gesso, que são de origem mineral e representam cerca de 90% da massa total dos resíduos da construção civil gerados na Europa, no Brasil e em alguns países asiáticos.

Existem inúmeras maneiras de reaproveitamento dos RCC em mistura com outros materiais de construção convencionais. Uma delas é a utilização desses materiais de descarte na composição de tijolos de solo-cimento. Essa reutilização traz vários benefícios, entre eles,

segundo Campos et al. (2019), redução no consumo de recursos naturais não renováveis, redução de áreas necessárias para aterro, redução do consumo de energia durante o processo de produção e redução da poluição.



Figura 7: Resíduos (a) resíduos de construção civil após a coleta em caçambas e (b) resíduo de construção civil triturado

Fonte: A autora.

Além disso, a incorporação parcial desses resíduos na confecção de tijolos de solo-cimento pode vir a ajudar a suprir a demanda de materiais ecologicamente corretos, que não poluem o meio ambiente, hoje em dia escasso no mercado.

2.4.1. Resíduo cerâmico

Os resíduos cerâmicos provenientes da construção civil e de olarias podem ser utilizados como estabilizantes do solo. Atualmente, o Brasil gera cerca de 90 kg por habitante por ano desse resíduo, que é quase todo lançado ao meio ambiente, sem nenhum tratamento (DALLACORT et al., 2002).

Materiais cerâmicos são fabricados com argila que, em estado natural, têm pequena atividade pozolânica, que, quando calcinada a uma temperatura da ordem de 700 a 900 °C, se torna reativa. O tratamento térmico modifica a estrutura cristalina da argila e a transforma em uma estrutura sílico-aluminosa amorfa. Este material, quando moído, Figura 8, apresenta composição físico-química que habilita seu uso como adição mineral em misturas com cimento Portland (DALLACORT et al., 2002).



Figura 8: Tijolos cerâmicos triturados.
Fonte: A autora.

Quando resíduos de materiais cerâmicos são aplicados como pozolânicos, pode haver redução considerável na emissão de gases para a atmosfera, uma vez que podem ser parcialmente utilizados como substituto de agentes de ligação. Segundo Silva et al. (2013), os blocos cerâmicos utilizados em construção de alvenaria, por exemplo, quando triturados, têm propriedades de aditivos na estabilização do solo com o cimento.

Os resíduos cerâmicos, segundo Silva et al. (2013), têm elevado teor de sílica, óxido de alumínio e conteúdo de óxido de ferro, correspondendo a cerca de 89,1% da sua composição. Este resultado excede o valor mínimo de 70% da soma dos óxidos de materiais de classe pozolana.

Segundo Theodoridou et al. (2016), desde a pré-história, tem-se utilizado tijolo triturado em conjunto com a cal, na ausência de pozolanas naturais, como substituto parcial para o cimento Portland na produção de argamassas.

A produção de tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos está inserida dentro do contexto do desenvolvimento sustentável. Isso porque atualmente na indústria da construção, o princípio básico é suportado pelo crescimento econômico planejado e pela preservação do meio ambiente (SILVA et al., 2013).

Estudo de Theodoridou et al. (2016) mostra que os valores de resistência à compressão em tijolos de solo-cimento com aditivos e tijolo cerâmico triturado foram mais altos em relação à mistura de solo-cimento natural, evidenciando, desta forma, a potencialidade do resíduo cerâmico.

Os materiais cerâmicos triturados e incorporados na mistura solo-cimento têm como principal característica potencializar o efeito pozolânico na mistura em razão da sua estrutura desorganizada de silicatos e aluminatos presentes e do longo prazo, podendo contribuir para o aumento da coesão entre as partículas e a densificação da mistura (SILVA et al., 2013).

2.4.2. Resíduo de concreto

O resíduo de concreto é um resíduo menos poroso e mais resistente presente no Resíduo da Construção Civil, passível de ser utilizado como agregado.

Ângulo e Figueiredo (2016) confirmam ser necessário segregá-lo na demolição para produzir agregados reciclados de melhor qualidade. O agregado granular reciclado proveniente do beneficiamento de resíduos de concreto, Figura 9, apresenta boas características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou em outras obras de engenharia (SEGANTINI E WADA, 2011).



Figura 9: Resíduo de concreto triturado
Fonte: A autora.

Os resíduos de concreto podem ser encontrados em obras iniciais ou em demolições, em empresas que fabricam artefatos de concreto (telhas, blocos etc.), conforme mostra a Figura 10, ou ainda em laboratórios de análises que geram uma quantidade significativa de corpos de prova de concreto.

Os resíduos de concreto são passíveis de serem beneficiados em agregados reciclados. A vantagem desses resíduos é o conhecimento de suas características como resistência mecânica, origem e composição, entre outras (NAGALLI, 2014).

A aplicação de resíduos de concreto está sendo utilizada para fabricação de artefatos de concretos, pavimentos, argamassas, tijolos de solo-cimento e outros.



Figura 10: a) Empresa que fabrica artefatos de concreto e b) Resíduos de concreto sem e com beneficiamento

Fonte: A autora.

Para Souza et al. (2008), os resíduos de concreto, quando triturados, têm características físicas semelhantes a uma areia grossa, podendo ser adicionados aos solos finos, corrigindo a composição granulométrica, de forma a torná-los viáveis para a confecção de tijolos de solo-cimento.

3 OBJETIVOS

Geral

Estudar a influência da substituição parcial do solo por resíduos da construção civil nas propriedades dos tijolos de solo-cimento.

Específicos

- I. Analisar as propriedades físicas do solo, do resíduo cerâmico, de concreto e mistos, que compõem os tijolos de solo-cimento;
- II. Levantar a influência do resíduo de construção civil misto recolhido por uma empresa coletora de entulhos e compará-lo com a substituição por resíduos isolados triturados de concreto e cerâmico nas propriedades dos tijolos de solo-cimento;
- III. Identificar entre os resíduos estudados aquele que tem maior influência nas propriedades mecânicas dos tijolos;
- IV. Observar entre as dosagens que serão estudadas aquela que apresenta os melhores resultados para utilização em tijolos de vedação; e
- V. Verificar se as propriedades de resistência mecânica, absorção de água e durabilidade atendem aos requisitos da norma NBR 10833 (ABNT, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, será abordada a fase experimental desta pesquisa, apresentando os materiais, equipamentos e procedimentos adotados para a fabricação dos tijolos de solo-cimento bem como a realização dos ensaios de caracterização física dos materiais e a caracterização mecânica dos tijolos.

4.1. Materiais

4.1.1 Solo

O solo é o material em maior proporção na composição do solo-cimento. Praticamente todos os tipos de solo podem ser utilizados para a fabricação dos tijolos, podendo, quando não têm as características adequadas, ser misturados a outros tipos de solo até obter um material que permita o menor consumo de cimento possível, uma adequada estabilização e boa compactação (CAMPOS et al., 2019).

O solo deve ser extraído a uma camada de 40 a 60 cm profundidade, de maneira a evitar a extração de matéria orgânica.

Como a confecção dos tijolos do presente trabalho foi feita em uma empresa que tem certificado de qualidade em fabricação e comercialização de tijolos de solo-cimento tradicional, o solo utilizado foi aquele que estava no local no dia da fabricação.

4.1.2. Cimento

O cimento utilizado na presente pesquisa foi o Portland CP V- ARI, pelo fato de este material não ter nenhuma adição na sua mistura, evitando o aumento das variáveis a serem analisadas na pesquisa.

Outro tipo de cimento bastante utilizado para a confecção dos tijolos de solo-cimento é o Cimento Portland, composto com pozolana - CP II Z-32. Esse tipo de cimento é o mais comercializado no Brasil, respondendo por, aproximadamente, 75 % da produção industrial do país (ABCP, 2002).

4.1.3. Resíduos da construção civil

Há vários estudos incorporando resíduos da construção civil na mistura de solo-cimento para confecção de tijolos. A maioria deles é apenas substituindo o solo por resíduos mistos da construção civil, recolhidos em caçambas. Ao recolher este tipo de material em caçambas, é necessário proceder a uma separação dos componentes que não fazem parte da gama de materiais de construção e que podem estar juntos no local. Estes tipos de resíduos mistos são constituídos basicamente de alvenaria e concreto provenientes de demolições e de novas construções.

Para a fabricação dos tijolos, os resíduos da construção civil, sejam eles mistos ou isolados, devem ser triturados em um triturador mecânico automático até ficarem com uma granulometria semelhante à de um agregado miúdo. Após triturados, devem ser peneirados em uma peneira de malha 4,8 mm, visando à sua transformação em material granular de aspecto semelhante a uma areia grossa de construção.

4.1.4. Equipamentos de laboratório

A seguir a descrição dos equipamentos utilizados para a realização das moldagens e ensaios dos tijolos:

- Máquina para fabricação de tijolos, podendo ser prensa manual ou prensa hidráulica;
- Prensa universal para ensaio de compressão simples dos tijolos, com capacidade de 2000 kN, da marca EMIC, com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade;
- Aparelho de Casagrande para determinação dos limites de Atterberg;
- Agitador de peneiras para ensaio de granulometria;
- Peneiras de 4,8; 2; 1,68; 0,6; 0,15 e 0,075 mm de abertura das malhas para peneiramento do solo para as moldagens e para ensaios de granulometria e limites de Atterberg;
- Estufa com temperatura regulável, utilizada para a secagem dos tijolos e sua posterior pesagem, parte do procedimento para determinação da absorção de água;
- Balança analítica;
- Outros: colher de pedreiro, enxada, pá de corte, serra circular, chapa metálica, tanque de água, carrinho de mão, vassoura etc.

4.2. Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram adotadas quatro etapas experimentais.

4.2.1. Caracterização dos materiais da mistura de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil

O solo, após coletado, e os resíduos, após coletados e triturados, devem ser depositados para secagem ao ar livre, protegidos das intempéries.

Após secagem prévia, foram separadas as amostras para os ensaios de caracterização física do solo e das misturas solo-resíduos. Para a caracterização física dos materiais, foram

utilizadas as normas brasileiras que descrevem os procedimentos de todos os ensaios necessários a serem feitos antes da fabricação dos tijolos.

A preparação das amostras de solo e de resíduos para os ensaios de caracterização estão descritas na NBR 6457 (2016). Esta norma traz as quantidades de materiais necessários para cada ensaio, além de todos os procedimentos a serem realizados na amostra analisada antes do ensaio propriamente dito.

Para determinação da análise granulométrica, a NBR 7181 (ABNT, 2016) traz um método por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. Este ensaio tem como objetivo dividir as partículas do solo em grupos pelas suas dimensões e determinar suas proporções relativas ao peso total da amostra, obtendo, dessa forma, os teores de areia, silte e argila no solo. A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos é obtida pelo peneiramento de uma amostra, enquanto para siltes e argilas, é utilizada a sedimentação dos sólidos no meio líquido.

Outro requisito normativo para a fabricação dos tijolos de solo-cimento são os limites de consistência do solo, sendo o limite de liquidez abordado pela NBR 6459 (ABNT, 2016) e os limites de plasticidade, pela NBR 7180 (ABNT, 2016). Esses dois ensaios devem ser executados em condições ambientais que minimizem a perda de umidade do material por evaporação, sendo preferível em recintos climatizados. Para o limite de plasticidade, são formados cilindros com pequenos fragmentos, cerca de 3 mm diâmetro e comprimento de ordem de 100 mm, que são pesados e levados para a estufa (110°C) para calcular sua umidade. Para o limite de liquidez, preenche-se aproximadamente 2/3 da concha do aparelho Casagrande e, com um cinzel padronizado, faz-se uma ranhura no meio da pasta de solo. O limite de liquidez é encontrado considerando o número de golpes necessários para que as duas bordas da ranhura se unam em torno de 1 cm.

Para obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia, são feitos os procedimentos adotados pela NBR 7182 (ABNT, 2016). O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), feito por sucessivos impactos de soquete padronizado na amostra. Com este procedimento, determina-se a relação, através de uma curva, entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos, quando compactados. A umidade ótima do solo pode ser encontrada no ponto em que a curva tem o máximo peso específico.

4.2.2. Definição das dosagens das misturas de solo-cimento com substituição de solo por resíduo da construção civil

A inexistência de um método de dosagem de tijolo de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil demandou estabelecer como referência as pesquisas desenvolvidas por Ali et al. (2016), Souza et al. (2008), Segantini e Wada (2011).

A substituição do solo por resíduos da construção civil do presente estudo se deu em 20 e 40% em relação à massa de solo. O teor de cimento foi fixado para todas as dosagens em 10% em relação à mistura solo-resíduo. As porcentagens das dosagens estudadas podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem em porcentagem dos materiais utilizados na composição do solo-cimento

Amostras	Solo (%)	Cimento (%)	Resíduo cerâmico (%)	Resíduo de concreto (%)	Resíduo misto (%)
Controle	90	10	0	0	0
<i>SLC₂₀CE</i>	70	10	20	0	0
<i>SLC₄₀CE</i>	50	10	40	0	0
<i>SLC₂₀CO</i>	70	10	0	20	0
<i>SLC₄₀CO</i>	50	10	0	40	0
<i>SLC₂₀M</i>	70	10	0	0	20
<i>SLC₄₀M</i>	50	10	0	0	40

Fonte: A autora.

4.2.3. Fabricação dos tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil

Os tijolos de solo-cimento com adição de resíduos da construção civil foram produzidos de acordo com as prescrições normativas de tijolo solo-cimento comum, a NBR

10833 (ABNT, 2013). Esta norma compreende os processos de fabricação de tijolo de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica.

Conforme esta norma, 100% dos materiais utilizados para a confecção dos tijolos devem ser previamente secos ao ar, posteriormente peneirados em uma peneira de malha 4,8 mm.

Para a confecção de tijolo de solo-cimento em prensa manual, os materiais são misturados em betoneira e transferidos para uma prensa onde é feita a prensagem através de um esforço em uma alavanca. A prensa hidráulica tem um misturador mecânico e a mistura é transferida automaticamente para o local da prensagem.

Para ambos os métodos de prensagem, a quantidade de água necessária para cada traço é estabelecida através de um teste empírico, que, conforme a ABCP (2016), consiste em apertar com a mão uma parcela da mistura homogeneizada, até que fiquem as marcas dos dedos. Depois, deve-se soltá-la a uma altura de um metro. Se a fração não se desmanchar com a queda, ela tem água em excesso, devendo, assim, ser feita uma correção com as proporções adequadas de material sólido. Esse processo deve se repetir até que a quantidade de água fique adequada para estabilização e compactação dos tijolos.

Os tijolos da presente pesquisa foram fabricados em uma prensa hidráulica com capacidade de fabricação de 3.000 unidades/dia, com prensagem de até duas toneladas. Foram fabricados vinte tijolos para cada traço estudado com dimensões de 6,5 x 12,5 x 25 cm. Após a confecção dos tijolos, procedeu-se ao tempo de cura úmida durante sete dias por meio de molhagens sucessivas três vezes ao dia.

4.2.4. Caracterização mecânica dos tijolos

As propriedades mecânicas foram analisadas aos 28 dias de idade. O ensaio de resistência à compressão simples e à absorção de água foi feito conforme as prescrições da NBR 8492 (2012). Esta norma estabelece um método para análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água em tijolos de solo-cimento para alvenaria, sem função estrutural.

Foram separadas dez amostras para o ensaio de resistência à compressão, cujo processo se inicia com a serragem dos tijolos ao meio com o auxílio de uma serra circular. Posteriormente, é feito o capeamento das faces inferior e superior, utilizando argamassa

cimento Portland de 2 a 3 cm de espessura, sendo necessário aguardar o endurecimento da pasta. A etapa seguinte compreende a junção das duas partes do corpo de prova utilizando a mesma argamassa descrita anteriormente, com o auxílio de uma colher de pedreiro. Após o endurecimento da massa de capeamento, os corpos de prova são identificados e colocados em superfície plana para cura úmida por meio de molhagens sucessivas durante sete dias.

Após a preparação das amostras, os tijolos são colocados um por vez na prensa universal com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade para fazer a compressão simples. A resistência do corpo de prova é obtida pela divisão da carga de ruptura pela sua área da seção transversal.

Para o ensaio de absorção de água, três tijolos inicialmente são secos em estufa a uma temperatura constante dentro da faixa de 105°C e 110°C, para que perca toda sua umidade, por um período de 24 horas, assim se obtém a massa seca da amostra. Posteriormente, os tijolos são imersos em água durante um período de 24 horas. Após a retirada das amostras do tanque, é obtida sua massa saturada. A diferença entre a massa saturada e a massa seca é a umidade absorvida pelos tijolos.

O ensaio de durabilidade foi conduzido em conformidade com a NBR 13554 (ABNT, 2016). Esta norma prescreve o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzido por ciclos de molhagem e secagem de corpos de prova de solo-cimento. Cinco amostras devem ser identificadas de nº1 ao nº5, determinando a umidade inicial h_i do corpo de prova nº1, que deve ser usado para obter a variação de umidade e a variação de volume durante o ensaio; já os corpos de prova de nº2 ao nº5 devem ser usados para obter a perda de massa durante o ensaio. Posteriormente, os cinco corpos de prova devem ser imersos em água, removendo-os após 5 h. O excesso da água superficial do corpo de prova nº1 deve ser retirado com um pano úmido e pesado, determinando sua massa e seu volume. Posteriormente, os cinco corpos de prova devem ser postos em estufa em temperatura $71 \pm 2^\circ\text{C}$ por 42 h e, então, retirados. Em seguida, devem ser determinados a massa e o volume do corpo de prova nº1. A escovação da superfície com uma escova em cada um dos corpos de prova, do nº2 ao nº5, deve ser feita no prazo de uma hora após a retirada da estufa. O procedimento, que constitui um ciclo de 48 h de molhagem e secagem, deve ser repetido mais cinco vezes. Após os seis ciclos, os cinco corpos de prova são levados à estufa em temperatura entre 105°C e 110°C até atingir massa constante. Os dados coletados permitem calcular a variação de umidade e a variação de volume do corpo de prova nº1 e a perda de massa dos corpos de prova nº2 ao nº5 após os seis ciclos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÂNGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Agregados Reciclados. Instituto Brasileiro do Concreto – Livro CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA, São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio*. São Paulo: ABCP 2004. 51 p. (ET-35).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. Boletim técnico (BT-111), São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6502 - *Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1995

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

_____. NBR 10833 - *Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimentos*. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 12253 - *Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento*. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 12653 - *Materiais pozolânicos — Requisitos*. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2019*. Disponível em <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: maio, 2020. 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7211: *agregados para concreto – especificação*. Rio de Janeiro, 2009.

BLUMENSCHNEIN, R. N.; SPOSTO, R. M. *Sustentabilidade, Qualidade e Racionalização na Indústria da Construção*. In: Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística, 2013, Brasília. Anais... Brasília: FAU - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2013.

BRASIL. 2002. *Resolução Conama n.º 307, de 5 de julho de 2002*. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 de julho de 2002.

CAMPOS, A.; CAMPOS, F. C. Incorporação de resíduos sólidos urbanos em tijolos solo-cimento: processos e cura, *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 40, n. 1, p. 73-86, 2019.

DALLACORT, R., JÚNIOR, H. C., WILLRICH, F. L., BARBOSA., N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p.511-518, 2002.

ESTABRAGH, A.; JAHANI, A.; JAVADI, A.; BABALAR, M. Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. *International Journal of Pavement Engineering*, To link to this article: <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736293>, 2020.

HERNANDES, R.; VILAR, O. M. *Utilização de resíduo de construção e demolição nas obras de ampliação e rebaixamento da calha do Rio Tietê*. In: Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos v. 1., p. 261 – 265, 2004.

HIDALGO, C.; CARVAJAL, G.; MUÑOZ, F. Laboratory Evaluation of Finely Milled Brick Debris as a Soil Stabilizer. *Sustainability*, v.11, nº967, 2019.

NAGALLI, A. *Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 216 p.

GIORGI, P.; GRIGOLETTI, G. C.; LIMA, R. C. A.; LORENZI, L. S. Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575. *Revista Matéria*, v.23, n.3, 2018.

REDDY, B. V.; LATHA, M. S. Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compact. *Materials and Structures*, v. 47, p. 1633-1645, 2013.

REIS, L. R. M.; Use of Waste from Construction and Demolition in the Manufacture of Soil-Cement Bricks: A Sustainable Alternative. *Materials Science Forum*, v.930, pg. 137-141, 2018.

SANTIAGO, C. C. *O solo como material de construção*, 2 ed. Salvador: EDUFBA, 2001. 72 p.

SANTOS, V. S. *Diagnóstico do gerenciamento de resíduos de construção civil gerados na área urbana de Rio Verde – go*. 2015. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, 2015.

SEGANTINI, A. A. S.; WADA, P. H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. *Acta Scientiarum*, v. 2, p.179-183, outubro 2011.

SENA, R. J., LAURSEN, A., & SILVA., J. S. Avaliação Mecânica de Tijolo Maciço Solo-Cimento Contendo Resíduo de Pet. *Veredas*, v. 10, 2017.

SILVA, V. M.; GÓIS, L. C.; DUARTE., J. B. Incorporation of Ceramic Waste into Binary and Ternary Soil-Cement Formulations for the Production of Solid Bricks. *Materials Research*, v. 17, p. 326-331, 2013.

SILVA, J. P. S. *Mecânica dos Solos*. 2015. 204 f. Apostila - Universidade Federal do Tocantins. Curso de Engenharia Civil, 2015.

SOUZA, M. L. 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, p. 205-212, setembro 2008.

THEODORIDOU, M; CHARALAMBOUS, E; MARAVELAKI-KALAITZAKI, P; IOANNOU, L. Amelioration of crushed brick - lime composites using nano-additives. *Cement and Concrete Composites*, v. 68, p. 77-87, 2016.

5 CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Ambiente Construído)

Estudo do Comportamento Mecânico de Tijolos de Solo-Cimento com Substituição de Solo por Resíduos da Construção civil

Study of the Mechanical Behavior of Soil-Cement Bricks with Substitution of Soil by Construction Waste

RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade e a tendência de escassez dos recursos naturais têm levado ao desenvolvimento de novos materiais, métodos ou processos de produção que minimizem os impactos negativos ao meio ambiente. Os resíduos de uso da construção estão entre os mais degradadores do meio ambiente, sendo importante seu reaproveitamento. Uma alternativa é sua incorporação na fabricação de tijolos de solo-cimento. Há uma carência por estudos que abranjam a influência das características dos diferentes tipos de resíduos da construção civil na confecção de tijolos de solo-cimento, sendo eles na forma como são recolhidos em caçambas de obras, os resíduos mistos, e resíduos da construção civil isolados, caso de resíduos de concreto e material cerâmico. Neste trabalho, são apresentados resultados de ensaios de laboratório, através dos quais se objetivou avaliar a possibilidade e a influência da substituição de solo por três tipos diferentes de resíduos da construção, o resíduo de concreto, de materiais cerâmicos e mistos, na confecção de tijolos prensados de solo-cimento. Foram estudadas porcentagens de 20% e 40% de resíduos em relação à massa de solo. O teor de cimento foi fixado para todas as composições estudadas em 10% em relação à mistura

solo-resíduo. Foram feitos ensaios de caracterização física do solo e das misturas de solo-resíduo. Para a confecção dos tijolos vazados de solo-cimento, utilizou-se prensa hidráulica. As propriedades mecânicas dos tijolos foram avaliadas por um ensaio de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade aos 28 dias de idade. Conforme os resultados dos ensaios, verificou-se que as substituições de solo pelos três tipos de resíduos proporcionaram melhoria nas propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cimento. Todas as composições solo-resíduos estudadas atenderam os requisitos normativos para confecção de tijolos utilizados em sistema de vedação. A separação dos resíduos de construção civil não beneficiou o comportamento mecânico dos tijolos de solo-cimento. Entre os três tipos de resíduos estudados, o resíduo misto se apresentou o mais viável, pois utiliza maior quantidade de materiais de descarte na sua composição e menos processos envolvidos para obtenção de melhores resultados. O reaproveitamento de resíduos diminui o volume descartado na natureza e proporciona obtenção de tijolos de melhor qualidade.

Palavras-chave: reciclagem, resíduos, materiais de construção, desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

The concern with sustainability and the tendency of scarcity of natural resources undergo the development of new materials, methods or production processes that minimize the negative effects on the environment. Construction waste is among the most degrading of the environment, and it is important to either reuse it. An alternative is the incorporation in the manufacture of cement bricks on the ground. There is a lack of studies that cover the influence of the characteristics of the different types of construction waste in the making of cement bricks, as they are collected in construction dumps, waste mixtures and construction waste, as is the case of concrete and ceramic material waste. In this work, the results of laboratory tests are presented, which aim to evaluate the possibility and the influence of the substitution of soil by three different types of construction waste, concrete waste, ceramic materials and mixtures in the manufacture of pressed bricks of soil-cement. Percentages of 20% and 40% of residues in relation to the soil mass were studied. The cement content was fixed for all studied compositions at 10% in relation to the soil-residue mixture. Tests of physical characterization of the soil and mixtures of soil residue were carried out. For the manufacture of hollow soil-cement bricks, use the hydraulic press. As the mechanical properties of the bricks were evaluated through the test of resistance to absorption, water absorption and resistance at 28 days of age. According to the results of the tests carried out,

it was found that as replacements of soil by the three types of residues, they provided improvements in the mechanical properties of soil-cement bricks. All studied soil-waste compositions meet the normative requirements for making bricks used in the sealing system. The separation of construction waste did not benefit the mechanical behavior of soil-cement bricks. Among the three types of waste studied, the mixed waste proves to be the most viable, as it uses a greater amount of disposal materials in its composition and less processes involved in the best results. The reuse of waste reduces the volume discarded in nature and provides the best quality brick waste.

Keywords: recycling, waste, building materials, sustainable development.

5.1 Introdução

Grande parte dos impactos ambientais é causada pelo descarte inadequado de resíduos, os quais exigem áreas extensas e apropriadas para sua disposição. Entre esses resíduos, segundo Blumenschein e Sposto (2013), os oriundos da indústria da construção civil, uma das atividades mais importantes da economia brasileira, estão entre os mais degradadores do meio ambiente. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017) relata que no Brasil são gerados 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos e, deste total, 45 milhões de toneladas constituem-se de resíduos da construção civil (RCC).

Os RCC são constituídos por qualquer tipo de material descartado em obra, sendo, portanto, uma mistura bastante variável, dependendo das técnicas construtivas e dos materiais aplicados na obra. Silva et al. (2013) apontam que 40 a 70% de resíduos urbanos vêm da construção e que os materiais descartados em obra são compostos por 64% argamassa, 30% de componentes utilizados na vedação (tijolos, telhas e blocos cerâmicos) e 6% de outros materiais (betão, pedras, areia e materiais metálicos).

Há várias maneiras de reaproveitamento dos RCC em mistura com outros materiais de construção convencionais. Uma delas é a utilização desses materiais de descarte na composição de tijolos de solo-cimento. Essa reutilização traz vários benefícios, entre eles, segundo Campos et al. (2019), redução no consumo de recursos naturais não renováveis, redução de áreas necessárias para aterro, redução do consumo de energia durante o processo de produção e redução da poluição.

Os tijolos de solo-cimento resultam da mistura homogênea de solo, cimento e água, compactada por prensagem, em prensa manual ou hidráulica, curada à sombra. Constituem

uma das alternativas para diversas aplicações na construção de alvenaria, garantindo, após o período de cura, resistência à compressão simples, similar à dos tijolos cerâmicos NBR 10833 (ABNT, 2013).

Os tijolos de solo-cimento são considerados de baixo impacto ambiental, pois requerem baixo consumo de energia na extração da matéria-prima, dispensam o processo de queima e reduzem a necessidade de transporte, uma vez que os tijolos podem ser produzidos com solo do próprio local da fabricação. Outro aspecto é a possibilidade de racionalização do processo construtivo, pois tijolos quebrados podem ser reaproveitados, moídos e prensados novamente, proporcionando redução de desperdícios e diminuição do volume de entulho gerado. Além disso, para a fabricação dos tijolos, os equipamentos são simples, não necessitando de mão de obra especializada (SEGANTINI E WADA, 2011).

Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, sendo um material de construção muito antigo (CAMPOS et al., 2019).

Para materiais que têm solo como matéria-prima, é necessária uma adequada estabilização que, segundo Hidalgo et al. (2019), tende a conferir ao produto final melhor estabilidade dimensional, aumento da resistência mecânica, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração por retração por secagem, resistência à erosão e à abrasão superficial e, com isso, aumento da durabilidade do material. De acordo com Estabragh et al. (2020), os principais tipos de estabilização são a mecânica, granulométrica, química, elétrica e térmica.

Segundo a NBR 12253 (2016), o solo para tijolos de solo-cimento deve ser selecionado de modo a permitir o menor consumo possível de cimento. O cimento representa uma quantidade que varia entre 5% e 10% da massa do solo, sendo suficiente para promover a estabilização e conferir as propriedades de resistência desejadas, sendo que as variações no teor de cimento ocorrem pela vasta diversidade de solos existentes. Segundo a Associação Brasileira Cimento Portland - ABCP (2016), os solos arenosos requerem, quase sempre, menores quantidades de cimento do que os argilosos e siltosos. À medida que aumenta o teor de argila no solo, aumenta a necessidade de consumo do cimento para estabilização.

A Norma Brasileira - NBR 10833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2013) recomenda que os solos mais adequados para a estabilização com cimento são: 100% passando pela peneira de 4,75 mm (nº 4); 10% a 50% passando pela peneira de 0,075 mm (nº 200); e índice de plasticidade (IP) menor ou igual a 18%).

Segundo Souza et al. (2008), o solo ideal para fabricação de tijolos de solo-cimento deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, sendo os solos arenosos bem graduados e com razoável quantidade de silte mais

argila os mais indicados por exigirem baixo consumo de cimento. O teor de fração fina, cerca de 20 % de silte e argila no solo, é necessário para a mistura de solo-cimento dar coesão suficiente à mistura solo-cimento (ESTABRAGH et al., 2020). Para Fraga et al. (2016), é aconselhável utilizar na mistura solo-cimento solos que contenham de 10% a 20% de argila, 10% a 20% silte e 50% a 70% de areia.

De maneira geral, o solo utilizado para a mistura solo-cimento deve ter uma parcela de areia, para adequada estabilização com o cimento, e também uma parcela de fração fina composta por argila e silte, responsável pela coesão da mistura quando umedecida e compactada (ESTABRAGH et al., 2020).

Os RCC, por terem características distintas, influenciam propriedades diferentes quando acrescentados na mistura solo-cimento para confecção de tijolos. Eles podem ser incorporados na mistura solo-cimento para substituição do cimento, quando o material tiver atividades pozolânicas, ou seja, com propriedades aglomerantes, ou em substituição do solo na mistura, cuja principal função será a correção da granulometria do solo.

A incorporação de RCC contribui com melhorias em várias propriedades dos solos-cimento. Ali et al. (2016) observaram que tijolos de solo-cimento contendo resíduo de material cerâmico apresentam maior resistência à compressão, quando comparado com a dosagem sem resíduo. Souza et al. (2008) também observaram que a utilização de resíduos de concreto em matriz de solo-cimento reduz a utilização de cimento na mistura em 6%. Segantini e Wada (2011) estudaram a utilização de resíduos mistos de construção civil, tendo obtido ótimos resultados nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos de solo-cimento à medida que se aumentava a quantidade de resíduo à massa do solo.

Objetivou-se, neste trabalho, estudar a influência da substituição parcial do solo por resíduos de construção civil nas propriedades dos tijolos de solo-cimento. Pretendeu-se, com isso, levantar a influência do resíduo de construção civil misto recolhido por uma empresa coletora de entulhos e compará-lo com a substituição por resíduos isolados triturados de concreto e material cerâmico nas propriedades dos tijolos de solo-cimento bem como avaliar a possibilidade técnica dessa aplicação e sua influência na qualidade dos tijolos. Além disso, contribuir no sentido de proporcionar uma alternativa apropriada para a destinação dos resíduos de construção e de demolição.

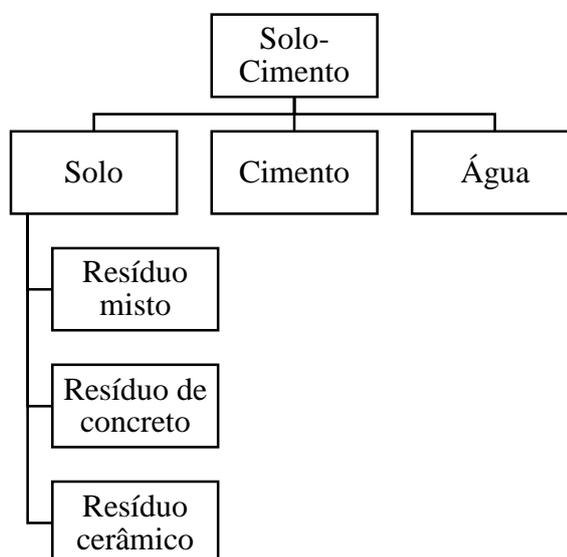
Os resíduos de concreto e cerâmicos podem ser encontrados facilmente nas caçambas de entulhos, não havendo, na maioria das vezes, uma separação correta de ambos os resíduos, sendo encontrados misturados com outros materiais. Poucos estudos têm sido conduzidos

comparando a eficiência dos resíduos puros, sem mistura, com aqueles encontrados misturados nas caçambas de entulhos.

5.2 Material e Métodos

Para a fabricação dos tijolos de solo-cimento, foram utilizados três tipos diferentes de resíduos de construção civil, Figura 1, para substituição do solo na mistura solo-cimento: resíduos mistos de construção civil, resíduos de concreto e resíduos cerâmicos. O cimento utilizado foi o Portland CP V- ARI pelo fato de este material não ter nenhuma adição na sua mistura, evitando o aumento das variáveis a serem analisadas na pesquisa.

Figura 1: Materiais utilizados na mistura solo-cimento-resíduo



Fonte: A autora.

Os resíduos mistos foram coletados em caçambas na cidade de Goiânia-GO pela RVN-Resíduos, empresa coletora de entulhos que faz a separação de materiais que têm potencialidade para reaproveitamento, triturados em triturador mecânico automático até ficarem com uma granulometria semelhante à de um agregado miúdo. Esse tipo de resíduo de construção civil é constituído na maior parte por restos de concretos, argamassas, tijolos, gessos e outros. Para os resíduos da presente pesquisa, a RNV-Resíduos forneceu o material já preparado para utilização com uma granulometria semelhante a uma areia de construção.

Os resíduos de concreto foram provenientes de restos de blocos de concreto com resistência entre 4 a 7 MPa de uma empresa que fabrica artefatos de concreto, a Girlenge Pré-Moldados, situada na cidade de Rio Verde - GO. Os resíduos foram gerados durante a

fabricação, moldagem ou transporte de blocos de concreto. A empresa fez a separação dos resíduos utilizando um triturador automático para fabricação dos agregados de concreto.

Os resíduos cerâmicos foram obtidos pela trituração de tijolos cerâmicos em um triturador automático no mesmo local onde foram preparados os resíduos de concreto. Esses três tipos de resíduos, Figura 2, foram coletados, secos ao ar e peneirados em uma peneira com abertura de malha de 4,8mm visando a uma granulometria semelhante à de uma areia grossa de construção. Após a peneiração dos materiais, foram feitas a caracterização física das misturas solo-resíduo, a fabricação e a caracterização mecânica dos tijolos.

Figura 2: Resíduos de construção civil: (a) Resíduos mistos; (b) Resíduos de concreto; (c) Resíduos cerâmicos



Fonte: A autora.

5.2.1. Caracterização dos Materiais da Mistura de Solo-Cimento

Na Figura 3 estão algumas imagens dos ensaios de caracterização física feitos no solo e nas misturas solo-resíduos.

As misturas com substituição do solo por resíduos misto, de concreto e cerâmico foram caracterizadas separadamente e comparadas com as características da mistura padrão de solo natural sem resíduos. Os ensaios foram embasados nas normativas brasileiras e feitos no Laboratório de Materiais da Universidade de Rio Verde – UniRV e no Laboratório de Física dos Solos do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde.

Os ensaios determinaram a composição granulométrica das misturas solo-resíduo segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016), os limites de consistência de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016) e a umidade ótima pelo ensaio de compactação NBR 7182 (ABNT, 2016).

Figura 3: Ensaio de caracterização física do solo e das misturas solo-resíduo: (a) limites de consistência, (b) compactação e (c) e (d) composição granulométrica.



Fonte: A autora.

5.2.2. Definição das dosagens das misturas de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil

A inexistência de um método de dosagem de tijolo de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil demandou estabelecer como referência as pesquisas desenvolvidas por Ali et al. (2016), Souza et al. (2008), Segantini e Wada (2011), resumidas no Tabela 2.

Tabela 2: Consumos e proporções dos materiais constituintes do tijolo de solo-cimento

	Ali et al. (2016)	Souza et al. (2008)	Segantini e Wada (2011)	Adotado
Tipo de resíduo substituído na mistura solo-cimento	Resíduo cerâmico	Resíduo de concreto	Resíduo misto	Resíduo misto, de concreto e cerâmico
Porcentagem de substituição do solo por resíduo (%)	50, 75 e 100	20, 40 e 60	40, 60, 80 e 100	20 e 40
Porcentagem de cimento (%)	10	6, 8 e 10	6, 8 e 10	10

Fonte: A autora.

Outro fator importante para a determinação das dosagens foi a tentativa de adição de 60% de resíduos na mistura solo-cimento. Para todos os três tipos de resíduos, os tijolos não tiveram uma boa compactação, não sendo moldados, o que não resultou em peças viáveis, conforme pode ser observado na Figura 4. Sendo assim, as dosagens estudadas no presente estudo foram de 20 e 40% de resíduo em relação à massa de solo (Tabela 2).

Os traços foram denominados de SLC, referentes ao solo cimento, seguido da porcentagem de substituição do solo por resíduo, a saber: SLC_{20CE} , SLC_{40CE} para os resíduos cerâmicos, SLC_{20CO} , SLC_{40CO} para resíduos de concreto e SLC_{20M} , SLC_{40M} para os resíduos mistos e a composição com solo natural sem resíduos chamada de controle (Tabela 3).

Figura 4: Tijolos de solo-cimento com 60% de substituição de solo por resíduo cerâmico.



Fonte: A autora.

O consumo de materiais em massa está expresso na Tabela 4. Os resíduos foram substituídos em relação à massa de solo, e o teor de cimento foi fixado em 10% em relação à massa de solo-resíduo.

Tabela 3: Dosagem em porcentagem dos materiais utilizados na composição do solo-cimento

Amostras	Solo (%)	Cimento (%)	Resíduo cerâmico (%)	Resíduo de concreto (%)	Resíduo misto (%)
Controle	90	10	0	0	0
<i>SLC₂₀CE</i>	70	10	20	0	0
<i>SLC₄₀CE</i>	50	10	40	0	0
<i>SLC₂₀CO</i>	70	10	0	20	0
<i>SLC₄₀CO</i>	50	10	0	40	0
<i>SLC₂₀M</i>	70	10	0	0	20
<i>SLC₄₀M</i>	50	10	0	0	40

Fonte: A autora.

Tabela 4: Consumo de materiais para os traços de tijolos de solo-cimento

Amostras	Solo (kg)	Resíduo (kg)	Cimento (kg)	Massa total (Kg)	Água (L)	A/C
Controle	100	0	10	110	7,4	0,74
<i>SLC₂₀CE</i>	80	20	10	110	9,4	0,94
<i>SLC₄₀CE</i>	40	60	10	110	14	1,4
<i>SLC₂₀CO</i>	80	20	10	110	11,10	1,11
<i>SLC₄₀CO</i>	40	60	10	110	11,10	1,11
<i>SLC₂₀M</i>	80	20	10	110	12,30	1,23
<i>SLC₄₀M</i>	40	60	10	110	13,60	1,36

Fonte: A autora.

5.2.3. Mistura e moldagem dos corpos de prova

Após estudar as características físicas dos materiais, procedeu-se à fabricação dos tijolos de solo-cimento, seguindo os parâmetros da NBR 10833 (ABNT, 2013). A confecção

dos tijolos foi feita em uma empresa que tem certificado de qualidade em fabricação e comercialização de tijolos de solo-cimento tradicional. O solo foi substituído parcialmente pelos resíduos, conforme estabelecido na Tabela 3, formando uma mistura solo-resíduo semelhante às misturas da Figura 5.

Figura 5: Solo e misturas solo-resíduos



Fonte: A autora.

Para a fabricação dos tijolos de solo-cimento, a homogeneização dos materiais foi feita em um misturador automático composto por cilindro de 800 litros com revestimento interno antiaderente, eixo rotor triturador de alta rotação, peneira vibratória, funil de armazenamento e sistema de concha para carregamento e padronização da dosagem.

A homogeneização dos materiais usando o misturador ocorreu por cerca de 5 minutos, adicionando água aos poucos até que a mistura atingisse uma consistência adequada para a moldagem. A quantidade de água necessária para cada traço foi estabelecida através de um teste empírico, que, conforme a ABCP (2016), consiste em apertar com a mão uma parcela da mistura homogeneizada até que fiquem as marcas dos dedos, Figura 6, soltando-a, posteriormente, a uma altura de um metro. Se a fração não se desmanchar com a queda é porque ela tem água em excesso, devendo ser feita a correção com as proporções adequadas de material sólido. Esse processo deve se repetir até que a quantidade de água fique adequada para a estabilização e a compactação dos tijolos.

Figura 6: Teste empírico para determinação da umidade ótima do solo



Fonte: A autora.

Utilizou-se prensa hidráulica automática com capacidade de fabricação de 3.000 unidades/dia para a confecção dos tijolos do presente estudo, com prensagem de até duas toneladas (Figura 7).

Os tijolos foram compactados e vazados com dimensões de 6,5 x 12,5 x 25 cm. Após a confecção dos tijolos, procedeu-se ao tempo de cura úmida durante sete dias por meio de molhagens sucessivas, três vezes ao dia.

Figura 7: Equipamentos para fabricação dos tijolos de solo-cimento: (a) prensa hidráulica e (b) misturador e esteira mecânica



Fonte: A autora.

5.2.4. Ensaio das propriedades mecânicas

Após 28 dias de idade das amostras, foram feitos ensaios para medir as propriedades mecânicas dos tijolos. O ensaio de resistência à compressão simples é um dos parâmetros mais importantes do solo-cimento, segundo a NBR 10833 (ABNT, 2013).

Os valores mínimos de resistência à compressão e à absorção de água para tijolos utilizados em sistemas de vedação estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Valores mínimos de resistência à compressão e à absorção de água de tijolos de solo-cimento para utilização em sistema de vedação

Valores mínimos	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

Fonte: Adaptado da NBR 10834 (2013).

O ensaio de resistência à compressão simples, Figura 8, foi feito no Laboratório de Estruturas da Universidade de Rio Verde, e o de absorção de água, no Laboratório de materiais do Instituto Federal Goiano- Campus Rio Verde, ambos segundo a NBR 8492 (ABNT, 2012). O ensaio de durabilidade foi feito simultaneamente com o de absorção de água, seguindo as recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2016).

Para o ensaio de resistência à compressão, os tijolos devem ser serrados ao meio, posteriormente as duas partes são sobrepostas por uma camada fina de pasta de cimento Portland de 2 a 3 cm de espessura e aguardado o endurecimento da pasta. Em seguida, foi feito o capeamento das duas faces com a mesma pasta de cimento. Após o endurecimento do material utilizado, os corpos de prova foram identificados e colocados em superfície plana para cura úmida por meio de molhagens sucessivas durante os primeiros sete dias.

Em seguida, dez amostras foram separadas para o início do ensaio de resistência à compressão. Os corpos de prova foram colocados diretamente sobre o plano inferior da máquina de ensaio à compressão, de maneira a ficar centrado em relação a ele (Figura 8). A aplicação da carga foi uniforme em uma razão de 500 N/s (50 kgf/s). A carga foi elevada até a ruptura dos tijolos.

Figura 8: Ensaio de resistência à compressão mecânica: (a) e (b) tijolos preparados e serrados ao meio, (c) ligação das duas partes com pasta de cimento, (d) capeamento das duas faces e (e) rompimento dos tijolos.



Fonte: Próprio Autor.

Para determinar os valores individuais de resistência à compressão das amostras, foi utilizada a Equação 1, descrita pela NBR 10834 (ABNT, 2013).

$$f_t = \frac{F}{S} \quad \text{Eq.1}$$

Em que,

f_t é a resistência a compressão simples, expressa em megapascals (MPa);

F é a carga de ruptura do corpo de prova, expressa em newtons (N);

S é a área de aplicação da carga, expressa em milímetros quadrados (mm²).

Para o ensaio de absorção de água, foram separadas três amostras de cada tijolo. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa com temperatura de 105 a 110 °C por 24 horas. Após a secagem, os tijolos foram imersos em água durante 24 horas, anotando os valores de massa dos tijolos a cada operação.

Para determinar os valores individuais de absorção de água em porcentagem, foi utilizada a Equação 2, descrita pela NBR 10834 (ABNT, 2013).

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Eq.2}$$

Em que,

A é absorção de água, expressa em porcentagem (%);

m_1 é a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g);

m_2 é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

O ensaio de durabilidade foi feito em paralelo ao ensaio de absorção de água aos 28 dias de idade, seguindo as recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2016). Foram utilizadas cinco amostras de cada tijolo, enumerados de 1 ao 5, colocados imersos em água durante 5 horas, após isso, foram secos em estufa com temperatura de 72 °C durante 42 horas. Os corpos de prova foram medidos e pesados antes e após a escovação.

O método determina a perda de massa, a variação de umidade e a variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos de prova de solo-cimento. A variação de massa é calculada pelas Equações 3, 4 e 5.

A quantidade relativa de água nos corpos de prova n°2 e n°3, após atingir massa constante, é igual à quantidade de água retida no corpo de prova n°1, calculada conforme a Equação 3.

$$A = \frac{M_{f(1)} - M_{i(1)}}{M_{i(1)}} \quad \text{Eq.3}$$

Em que,

A água retida no corpo-de-prova n°1 (%)

$M_{f(1)}$ massa seca final do corpo-de-prova n°1 após atingir massa constante (g)

$M_{i(1)}$ massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do corpo-de-prova n°1 (g).

Feito isso, é necessário corrigir as massas secas dos corpos de prova do n° 2 ao n° 5, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio que ficou retida no corpo de prova n° 1 a 110°C, conforme Equação 4.

$$M_{fc(2,3,4,5)} = \frac{M_{f(2,3,4,5)}}{(A+1,00)} \quad \text{Eq.4}$$

Em que,

$M_{fc(2,3,4,5)}$ massa seca final do corpo-de-prova n°2 e n°3 (g)

$M_{f(2,3,4,5)}$ massa seca final dos corpos-de-prova n°2 ao n°5 após atingir massa constante (g)

A água retida no corpo-de-prova n°1 (%).

A perda de massa dos corpos de prova n° 2 ao n° 5 como porcentagem da massa seca inicial é calculada pela Equação 5.

$$P_{m(2,3,4,5)} = \frac{M_{i(2,3,4,5)} - M_{fc(2,3,4,5)}}{M_{i(2,3,4,5)}} \times 100 \quad \text{Eq.5}$$

Em que,

$M_{i(2,3,4,5)}$ massa seca inicial calculado, por ocasião da moldagem dos corpos-de-prova n°2 a n°5 (g).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Caracterização Física dos Materiais

5.3.1.1 *Análise granulométrica*

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica do solo e das misturas solo-resíduos para a confecção dos tijolos de solo-cimento, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016).

Observa-se na Tabela 6 que o solo tem 41,56% de areia, 14,95% de silte e 43,49% de argila em sua composição. A parcela de finos, argila e silte, é maior que a porcentagem de areia, tornando o solo predominantemente argiloso. Enquanto isso, à medida que o solo é substituído por resíduos na mistura solo-cimento, a porcentagem de areia aumenta, levando as misturas solo-resíduos a se tornarem predominantemente arenosas.

O solo em estudo em sua composição natural, segundo Fraga et al. (2016), não tem proporções adequadas para a fabricação de tijolos de solo-cimento. Segundo os autores, é aconselhável utilizar solo que contenha 10% a 20% de argila, 10% a 20% silte e 50% a 70% de areia. Já Souza et al. (2008) indicam que os solos mais apropriados devem ter quantidades de areia entre 45 e 50%. A mistura de solo com os resíduos propiciou a constituição de um novo material, com características granulométricas dentro da faixa recomendada para a produção do solo-cimento. Para Estabragh et al. (2020), o teor ideal de silte e argila é de 20 %, necessário para coesão suficiente da mistura solo-cimento. Uma quantidade maior de

argila demanda uma quantidade maior de cimento para adequada estabilização, deixando de ser viável do ponto de vista econômico e ambiental.

Tabela 6: Análise granulométrica das misturas solo-resíduos

Amostras	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Controle	41,56	14,95	43,49
<i>SLC₂₀CE</i>	49,14	15,63	35,23
<i>SLC₄₀CE</i>	60,78	13,64	25,58
<i>SLC₂₀CO</i>	50,88	22	27,12
<i>SLC₄₀CO</i>	65,38	23,87	10,74
<i>SLC₂₀M</i>	51,87	24,89	23,24
<i>SLC₄₀M</i>	58,26	14,03	27,71

Fonte: A autora.

Por consequência, as misturas solo-resíduo em estudo alcançaram as proporções de areia, argila e silte recomendadas pelos autores. Sendo assim, os resíduos de concreto, cerâmico e misto são materiais excelentes para correção da granulometria do solo em estudo, de modo a torná-lo mais arenoso e mais propício à confecção do solo-cimento.

5.3.1.2. *Limites de consistência*

Para a análise dos estados físicos de uma amostra de solo quando submetida à ação da umidade, foram determinados os limites de consistência do solo, que são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade dos solos.

Foram determinados o limite de liquidez (LL), que caracteriza a passagem do estado plástico para o estado líquido, e o limite de plasticidade (LP), que caracteriza o momento em que, se retirada, progressivamente, a umidade do solo, este passa do estado plástico para o estado semissólido. A diferença entre o LL e o LP é o índice de plasticidade (IP), que representa a quantidade de água necessária a acrescentar ao solo para que ele passe do estado plástico para o líquido (SILVA, 2015). Os resultados dos ensaios para as misturas solo-resíduo em estudo encontram-se na Tabela 7.

A norma que estabelece os requisitos para a fabricação de tijolos de solo-cimento, a NBR 10833 (ABNT, 2013), indica que os valores adequados para um produto final de qualidade são $LL \leq 45\%$ e $IP \leq 18\%$. Valores elevados dificultam a estabilização do solo com o cimento e, segundo Souza et al. (2008), podem conduzir a maiores dificuldades na secagem e também no processo de mistura dos componentes. Conforme pode ser observado na Tabela 7, ambos os parâmetros foram alcançados tanto para composição com solo natural sem resíduo, quanto para as misturas solo-resíduo. Portanto, os três tipos de resíduos estudados alcançaram os limites de consistência desejada na mistura solo-cimento.

Tabela 7: Limites de consistência

Amostras	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Controle	37,75	28,90	8,84
<i>SLC₂₀CE</i>	32,22	24,17	8,05
<i>SLC₄₀CE</i>	31,01	25,58	5,43
<i>SLC₂₀CO</i>	30,99	24,08	6,91
<i>SLC₄₀CO</i>	27,52	23,79	3,72
<i>SLC₂₀M</i>	32,31	26,28	5,73
<i>SLC₄₀M</i>	30,46	25,92	4,54

Fonte: A autora.

Conforme observado, os resíduos proporcionaram mistura de solo natural e diminuição nos limites de consistência do solo. Esta redução é bastante positiva e pode ser decisiva na melhoria da qualidade do solo-cimento, pois a redução dos limites de consistência contribui para melhores condições de trabalhabilidade ao solo-cimento.

Entre as composições estudadas, na medida em que se substituiu o solo por 40% de resíduos, houve diminuição dos limites de consistência do solo de todas as misturas, demonstrando que, ao substituir solo por resíduos de material cerâmico, de concreto e misto, não há perdas para a qualidade final da mistura, havendo boa flexibilidade no que se refere à quantidade de resíduo utilizada.

Entre as dosagens estudadas a que teve melhor resultado em relação aos limites de consistência do solo foi a mistura com substituição de solo por 40% de resíduos de concreto

($SLC_{40}CO$), obtendo redução nos valores de LL, LP e IP, quando comparado com o controle (Tabela 7).

5.3.1.3. Compactação do solo

A umidade adequada para a mistura solo-cimento pode ser determinada pela compactação, que é o processo pelo qual se reduz o volume de vazios do material, tendo como consequência aumento da massa específica, fator esse que pode influenciar na sua resistência mecânica. O teor de umidade no qual o solo atinge sua maior massa específica aparente seca é denominado de umidade ótima (SILVA et al., 2013).

A umidade ótima é um parâmetro importante nos trabalhos feitos com solos, pois propicia melhores condições de trabalhabilidade e máxima compactação do material. A Tabela 8 mostra os valores encontrados desses parâmetros para o solo e a mistura solo-resíduos do presente estudo, considerando o ensaio de compactação do solo, feito segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016).

Tabela 8: Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do solo e mistura solo-resíduos

Amostras	Umidade Ótima (W_{ot}) (%)	Massa específica aparente seca máxima (ρ_d) (kg/cm ³)
Controle	14,53	1969
$SLC_{20}CE$	18,12	1497
$SLC_{40}CE$	19,80	1254
$SLC_{20}CO$	19,36	852
$SLC_{40}CO$	16,34	1627
$SLC_{20}M$	19,31	1502
$SLC_{40}M$	14,00	1751

Fonte: A autora.

Observa-se que, entre as composições analisadas, a $SLC_{40}M$ foi a única mistura que proporcionou redução do valor de umidade ótima, porém não houve aumento na massa específica, quando comparada com o controle. As demais misturas solo-cimento-resíduos

não causaram aumento na umidade ótima e não houve diminuição na massa específica aparente seca máxima.

Materiais que têm umidade ótima baixa e massa específica aparente seca máxima alta são mais compactos e isto significa que houve uma melhor acomodação interna dos grãos no processo de compactação. A tendência, portanto, é obter materiais mais resistentes (SILVA, 2015).

Comparando as dosagens isoladamente, o valor de umidade ótima nas misturas com substituição parcial de solo por resíduos cerâmicos foi maior à medida que houve aumento na porcentagem de resíduo na mistura solo-cimento, sendo de 18,12% para a $SLC_{20}CE$ e de 19,80% para a $SLC_{40}CE$. Essa relação não é observada para as composições com resíduo de concreto e mistos, sendo que um aumento de resíduo na mistura ocasionou redução nos valores de umidade ótima.

Em relação a massa específica aparente seca máxima, o maior valor foi para a mistura $SLC_{40}M$, mostrando que, dentre as outras composições de solo-cimento-resíduo, foi a que teve melhor acomodação dos grãos do solo e resíduos. E o menor valor encontrado de massa específica foi para a mistura $SLC_{20}CO$, podendo ocasionar normalmente menores valores de resistência à compressão e maiores valores de absorção de água.

Os acréscimos nas misturas comparados com o controle, segundo Souza et al. (2008), são ocasionados pela adição de cimento ao solo, pela maior quantidade de finos, normalmente tendendo a aumentar o valor da umidade ótima, o que de fato aconteceu para o solo utilizado neste trabalho. Para o solo natural, por exemplo, obteve-se umidade ótima de 14,53%, enquanto para as composições com resíduos, os valores encontrados foram maiores que este, chegando a 19,80% para a $SLC_{40}CE$. Sendo assim, os resíduos substituídos por solo na mistura têm em sua composição grande parte constituída de materiais cimentícios, que fizeram com que a umidade ótima do solo aumentasse e, por consequência disso, os valores de A/C na mistura também aumentassem.

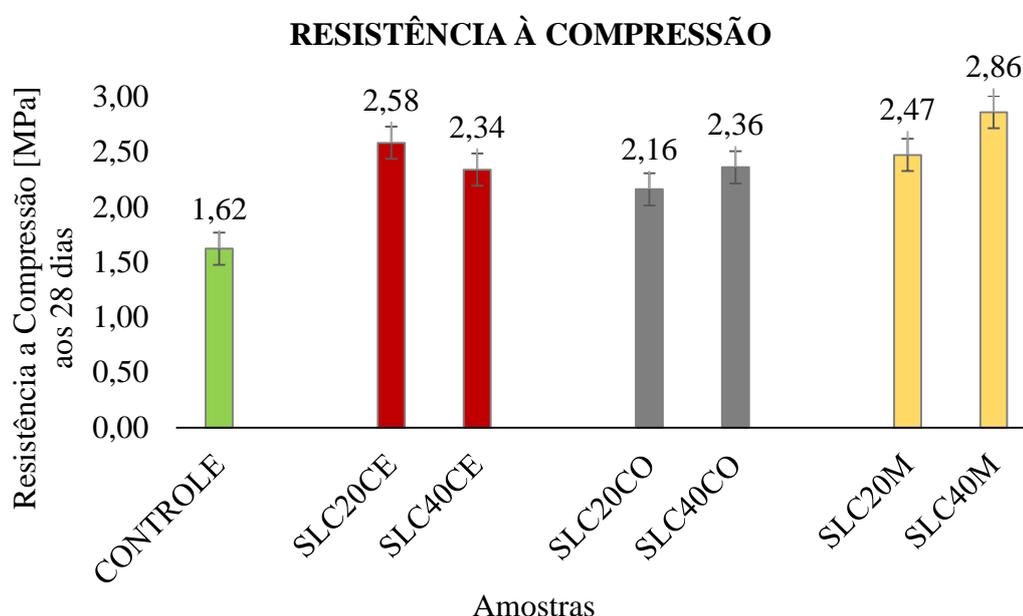
5.3.2. Caracterização Mecânica dos materiais

5.3.2.1. Resistência a compressão

A Figura 9 mostra os valores médios de resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento com substituição de solo por três tipos de resíduos: cerâmico, de concreto e misto. Os valores encontrados podem ser comparados com a composição de solo natural, chamado de controle, sem adição de resíduos.

O ensaio foi feito em conformidade com a NBR 8492 (ABNT, 2012), e o valor médio, de acordo com a NBR 10834 (ABNT, 2013), não devendo ser menores do que 2,0 Mpa para utilização em sistema de vedação. De modo geral e conforme indicado na Figura 9, observa-se que as substituições de solo por resíduos promoveram elevação dos valores de resistência à compressão simples do material em estudo. As misturas solo-resíduos alcançaram resistência mínima de 2,0 MPa, o que é exigido para tijolos usados em sistema de vedação.

Figura 9: Resistência média dos tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos.



Fonte: A autora.

Contudo, o traço com solo natural sem resíduos não atendeu as prescrições da normativa brasileira. Esse fato pode ser explicado pela granulometria do solo, sendo este solo com características argilosas, havendo necessidade de uma maior quantidade de cimento para adequada estabilização. Segundo a ABCP (2016), os solos arenosos requerem, quase sempre, menores quantidades de cimento do que os argilosos e silteosos. À medida que se aumenta o teor de argila no solo, aumenta-se a necessidade de consumo do cimento para estabilização adequada. Uma má estabilização gera materiais menos resistentes e menos duráveis.

Sendo assim, o solo natural com 41,56% de areia, 14,95% de silte e 43,49% de argila em sua composição, quando, por exemplo, substituída por 40 % de resíduo misto, passou a

ter 58,26% de areia, 14,03 % de silte e 27,71% de argila, contribuindo para o aumento da resistência em 56%. Uma granulometria grosseira para a mistura solo-cimento favorece a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores.

De modo geral e conforme indicado na Figura 9, observa-se que as substituições de solo por resíduos promoveram elevação dos valores de resistência à compressão simples do material em estudo. As misturas solo-resíduos alcançaram resistência mínima de 2,0 MPa, o que é exigido para tijolos usados em sistema de vedação.

Observa-se que, nos traços com tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos de concreto e misto, houve aumento na resistência à medida que se acrescentou uma quantidade maior de resíduo à mistura. Para as composições com resíduos de concreto, houve um aumento de 9,25% na SLC_{40CO} comparado com a SLC_{20CO} . E para as misturas com resíduos mistos, de 15,7% na SLC_{40M} , quando comparado com a SLC_{20M} .

Desta forma, entre os três resíduos, os resíduos de concreto e mistos têm maiores valores de resistência quando substituem o solo em 40% na mistura solo-cimento. Em termos sustentáveis, os dois tipos de resíduos se tornam mais viáveis para confecção de tijolos ecológicos, uma vez que apresentam melhores resultados quando se adiciona uma maior quantidade de material de descarte na composição do solo-cimento em confecção de tijolos.

Já para as misturas com substituição de solo por resíduos cerâmicos, a resistência à compressão foi inversamente proporcional à porcentagem de resíduos na mistura solo-cimento. Sendo assim, a confecção de tijolos de solo-cimento com substituição de 20% de resíduo cerâmico garante melhores resultados, quando comparado com a substituição de 40%.

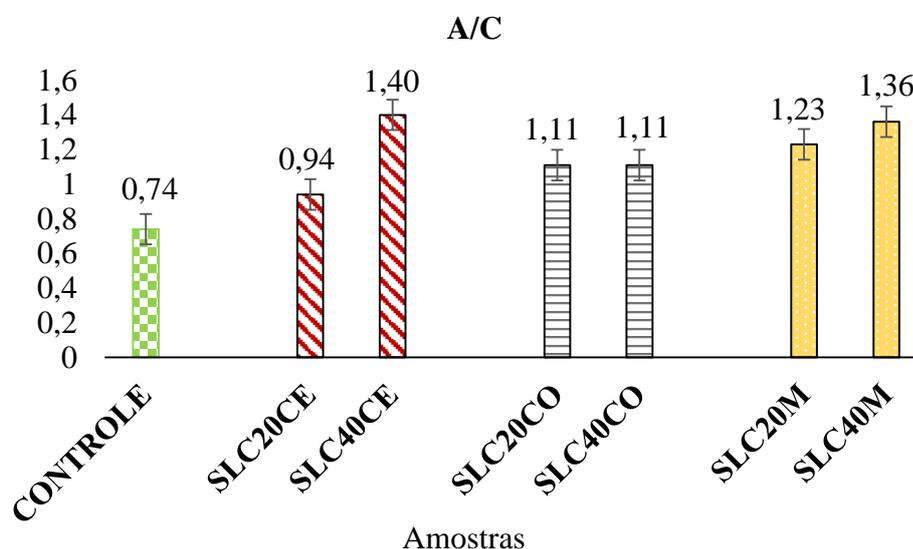
A Figura 10 mostra os valores de A/C das dosagens estudadas. O menor valor de A/C foi para a mistura com solo natural, sem adição de resíduos. Para as misturas com resíduo cerâmico e de concreto, houve aumento no valor de A/C, à medida que foram acrescentados resíduos na mistura solo-cimento. Para as composições com resíduos de concreto, permaneceu o mesmo valor de A/C para dosagens com 20 e 40% de resíduos em relação à massa de solo.

A resistência mecânica das misturas de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos foi inversamente proporcional ao valor do parâmetro A/C. Para a mistura SLC_{20CE} , com resistência de 2,58 MPa, a A/C foi de 0,94, enquanto para a SLC_{40CE} , a resistência foi de 2,34 MPa e A/C de 1,40, comprovando que, para essas composições, à medida que substituiu solo por este tipo de resíduo na mistura solo-cimento, houve um consumo maior de água, o que proporcionou redução nos valores de resistência a compressão.

O aumento da A/C na $SLC_{40}CE$ está relacionado com a natureza do material cerâmico, sua finura e porosidade propiciam maior consumo de água.

Para as composições com resíduo de concreto, os valores de A/C permaneceram os mesmos, porém houve aumento na resistência à compressão, sendo de 2,16 MPa para $SLC_{20}CO$ e de 2,36 MPa para $SLC_{40}CO$, estando este fato relacionado com os menores valores dos limites de consistência observados na Tabela 7, que proporcionaram melhores condições de trabalhabilidade ao solo-cimento, trazendo melhorias nas propriedades de resistência à compressão dos tijolos.

Figura 10: Relação A/C para os tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos



Fonte: A autora.

Para as dosagens com substituição de resíduo misto, os valores de A/C, Figura 10, ficaram bem próximos para as misturas $SLC_{20}M$ e $SLC_{40}M$, de 1,23 e 1,36, respectivamente. Os valores de resistência à compressão foram proporcionais aos valores de A/C, para a $SLC_{20}M$, foram de 2,47 MPa, e para $SLC_{40}M$, de 2,86 MPa. O aumento de A/C não ocasionou perda na resistência à compressão dos tijolos. Esse aumento está relacionado com a natureza do material, constituído de material cerâmico, o que leva a um maior consumo maior de água.

Entretanto, o maior de valor de resistência à compressão encontrado foi para a mistura de $SLC_{40}M$, que teve um maior consumo de A/C, quando comparada com as demais composições. Porém foi a mistura que apresentou maior massa específica, quando comparada com as demais misturas de solo-cimento-resíduos, Tabela 8, caracterizando como a

propriedade responsável pelo elevado valor de resistência à compressão, pois, segundo Segantini e Wada (2011), a diversidade de granulometria de materiais proporcionou melhor acomodação entre as partículas. Este fato pode ser observado pelo valor de massa específica seca máxima entre as partículas. Este fato pode ser observado pelo valor de massa específica seca máxima ($\rho_d = 1751 \text{ kg/cm}^3$), a maior entre as misturas solo-resíduo.

Para Alcântara et al. (2014), a quantidade de água utilizada na fabricação dos tijolos convencionais de solo-cimento é um fator de extrema importância e sua eficiência é favorecida com o nível de cimentação interna do material, decorrente das reações de hidratação do cimento. Um aumento do fator A/C faz com que a mistura solo-cimento tenha um papel da hidratação do cimento menos relevante. Diante disso, para uma dosagem, ideal deve-se considerar uma relação $A/C < 1,0$ (ALCÂNTARA et al., 2014).

De acordo Alcântara et al. (2014), o traço que estaria dentro da dosagem ideal de A/C seria o Controle, sem adição de resíduo, e o $SLC_{20}CE$ com substituição parcial de solo com A/C de 0,74 e 0,94, respectivamente. Porém, como se pode notar, a substituição de solo por resíduos ocasionou aumento no consumo de água nas misturas, comprovado na Tabela 8, com aumento da umidade ótima do solo. Contudo, o aumento da A/C não fez com que os traços não atendessem os requisitos mínimos da NBR 8492 (ABNT, 2012), relacionados aos valores de resistência à compressão de tijolos utilizados em sistemas de vedação.

Verifica-se, contudo, que, entre as porcentagens de substituição de 20 e 40% de solo por resíduos, não houve grandes variações na resistência à compressão, indicando haver uma boa flexibilidade no que se refere à quantidade de resíduos a ser utilizada, sem perdas para a qualidade final da mistura.

Portanto nota-se que os resíduos estudados de material cerâmico, concreto e mistos são ótimos para incorporação da mistura solo-cimento, podendo ser utilizados em até 40%, sem prejuízo para os tijolos, ou seja, o solo-cimento é uma excelente matriz para o aproveitamento desses resíduos.

Além disso, a mistura que apresentou melhor comportamento mecânico foi aquela em que não houve uma separação de materiais, a $SLC_{40}M$, constituída de vários materiais presentes em caçambas de entulhos, mostrando que esta diversidade de materiais contribuiu positivamente para os tijolos. Em termos de sustentabilidade, ela seria a mais viável, já que se utiliza uma maior quantidade de materiais de descarte na sua composição e menos processo envolvido para obtenção de melhores resultados de resistência à compressão.

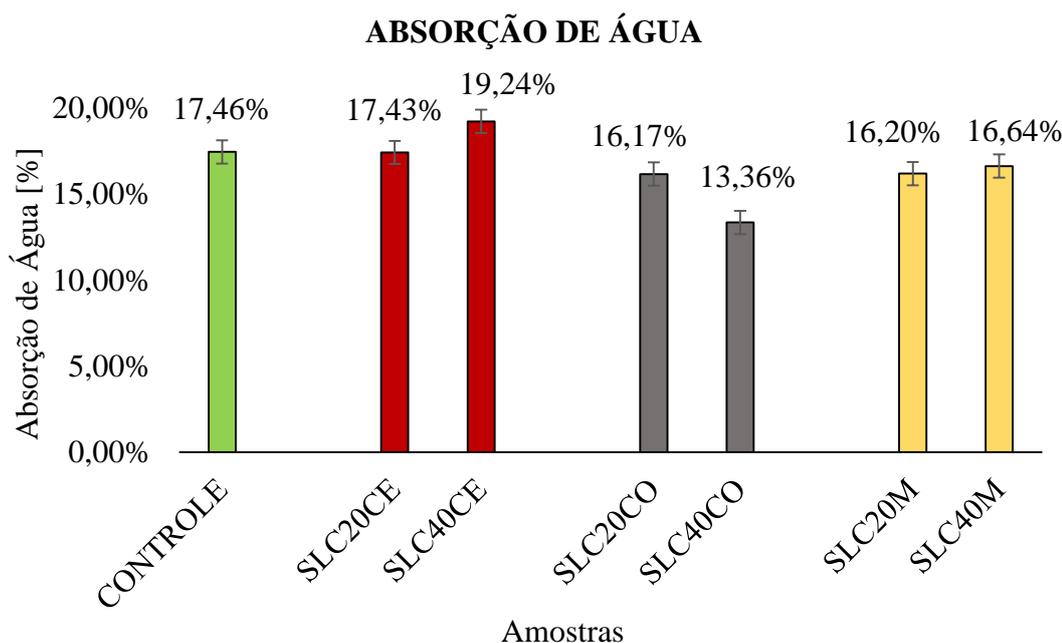
5.3.2.1. Absorção de água e durabilidade

Para a absorção de água dos tijolos, a NBR 10834 (ABNT, 2013) especifica que os valores das médias das amostras devem ser menores ou iguais a 20%. A Figura 11 mostra os resultados encontrados para os tijolos das composições em estudo.

Em geral, todas as composições estudadas apresentaram valores de absorção de água menores que 20%, requisito mínimo em tijolos para sistema de vedação.

Como observado na Figura 11, houve redução na absorção de água das composições solo-resíduos em comparação com a composição de solo natural sem resíduo. Segundo Souza et al. (2008), os resíduos proporcionam uma melhor acomodação das partículas na compactação, portanto, obtenção de materiais mais resistentes, com menor absorção de água e mais duráveis.

Figura 11: Absorção de água para os tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos



Fonte: A autora.

A absorção de água nas composições com resíduos cerâmicos e mistos foi proporcional à porcentagem de substituição de resíduo na mistura solo-cimento. Para as composições com resíduos cerâmicos, houve aumento de 10,38% na $SLC_{40}CE$, comparado com a $SLC_{20}CE$. E para as misturas com resíduos mistos, de 2,27% na $SLC_{40}M$, comparado com a $SLC_{20}M$.

Segundo Ali et al. (2016), os resíduos de materiais cerâmicos são compostos por partículas microporosas, as quais, ao serem adicionadas à mistura de solo-cimento, proporcionaram maior porosidade e, conseqüentemente, tijolos com maior capacidade de absorção de água. A Figura 11 mostra que as composições que tiveram maiores valores de absorção de água foram aquelas com resíduos puros de materiais cerâmicos e mistos, que têm uma parcela constituída por restos de alvenaria, sendo assim, materiais cerâmicos na sua composição.

Para as composições com resíduos de concreto $SLC_{20}CO$ e $SLC_{40}CO$ na medida em que se aumentou a porcentagem de substituição do solo por resíduos, houve aumento na absorção de água. Esses valores estão em conformidade com a Tabela 8, em que a $SLC_{40}CO$ teve um maior valor de massa específica, quando comparada com a $SLC_{20}CO$, o que proporcionou materiais mais compactos e com menor absorção de água (Figura 11).

Entre as composições solo-cimento-resíduos estudadas, a mistura com substituição de solo por resíduo de concreto apresentou menores valores de absorção de água. Isso pode ser explicado pelo fato de o resíduo de concreto ser menos poroso que os demais resíduos, explicando os menores valores de absorção de água encontrados (SOUZA et al., 2008).

A durabilidade dos tijolos (Tabela 9) pode ser comprovada pelo ensaio de perda de massa, segundo as recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2016), explicado no item 2.4 deste artigo.

Tabela 9: Durabilidade dos tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmicos, de concreto e mistos

Amostras	A (%)	$M_{fc(2,3,4,5)}$ (g)	$P_{m(2,3,4,5)}$ (g)
Controle	-0,11751	20906,49	0
$SLC_{20}CE$	-0,1366	18677,39	0
$SLC_{40}CE$	-0,1422	18180,62	0
$SLC_{20}CO$	-0,1233	20215,24	0
$SLC_{40}CO$	-0,1063	20060,58	0
$SLC_{20}M$	-0,1323	18559,65	0
$SLC_{40}M$	-0,1366	19010,26	0

Fonte: A autora.

A Tabela 9 mostra que a perda de massa (P_m) das composições foi igual a zero, comprovando que os tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos cerâmico, de concreto e misto, após cinco ciclos de molhagem e secagem, não perderam a qualidade.

5.4 Conclusões

O presente trabalho analisou a influência da substituição parcial do solo por resíduos de construção civil nas propriedades dos tijolos de solo-cimento. A substituição do solo foi feita por três tipos diferentes de resíduos, em dosagens de 20 e 40% em relação à massa de solo. Com isso, pretendeu-se levantar a influência do resíduo de construção civil misto recolhido em caçambas, sem separação adequada, e compará-lo com a substituição de solo por resíduos isolados triturados de concreto e material cerâmico.

1. O solo-cimento é uma excelente matriz para o aproveitamento dos resíduos de concreto, de material cerâmico e de resíduos mistos, possibilitando a substituição do solo em 40% de resíduos em relação à sua massa, sem prejuízos para as características do solo-cimento.
2. O solo em estudo, na sua composição natural, não tem proporções adequadas para a fabricação de tijolos de solo-cimento. Os resíduos de concreto, cerâmico e mistos são materiais excelentes para correção da granulometria, de modo a torná-lo mais arenoso e mais propício à confecção do solo-cimento.
3. Todos os traços com substituição de solo por resíduos atenderam plenamente às especificações das normas brasileiras, mostrando haver possibilidade de utilizar dosagens de substituição de 20 e 40% na confecção dos tijolos de solo-cimento.
4. Para os tijolos com resíduo cerâmico em sua composição, o teor de substituição de 20% de solo por resíduos ocasionou os máximos resultados de resistência à compressão em comparação com a substituição de 40%. Já para as composições com os resíduos de concreto e mistos, a substituição de solo por 40% de resíduos trouxe melhores resultados na resistência dos tijolos, em comparação com as substituições de 20%.
5. Entre os resíduos estudados, a mistura de solo-cimento com substituição de solo por 40% de resíduo misto ($SLC_{40}M$) foi a que apresentou melhor resultado de resistência à compressão nos tijolos. Esta mesma composição também teve o maior valor de massa específica em comparação com as demais composições de solo-cimento-resíduos. Este fato vem da diversidade do tipo e granulometria dos materiais em sua constituição, propiciando melhor acomodação entre as partículas e maior resistência nos tijolos.

6. A separação dos resíduos de construção civil não beneficiou o comportamento mecânico dos tijolos de solo-cimento. A dosagem estudada que apresentou melhores resultados de resistência à compressão foi aquela em que não houve separação de materiais, ou seja, a mistura de solo-cimento com substituição de solo por 40% de resíduo misto (*SLC_{40M}*), constituída de vários materiais presentes em caçambas de entulhos. Sendo desta forma, a mais viável, já que utiliza maior quantidade de materiais de descarte na sua composição e menos processos envolvidos para obtenção de melhores resultados.

7. Em geral, as propriedades estudadas do solo e do solo-cimento apresentaram melhorias sensíveis com resíduos de concreto, de material cerâmico e misto na confecção de tijolos, constituindo uma alternativa para o reaproveitamento destes resíduos, reduzindo o volume descartado na natureza.

5.5 Referências Bibliográficas

ALCANTARA, M. A., NUNES, S. C., RIO, J. F. (2014). Estudo do Solo-Cimento Autoadensável Produzido com Solos da Região do Porto-Pt. Parte I: Caracterização De Propriedades Mecânicas. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 37-51.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. Boletim técnico (BT-111), São Paulo, 2016.

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

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 8492**: Tijolo de solo - cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 10834:** Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12253:** Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13554:** Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2017*. Disponível em <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: novembro, 2019. 74 p.

Ali, N.; Shahidan, S.; Khairy, M.; Abdullah, S. Investigation of compressed earth brick containing ceramic waste. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, N°. 8, 2016.

BLUMENSCHNEIN, R. N.; SPOSTO, R. M. *Sustentabilidade, Qualidade e Racionalização na Indústria da Construção*. In: Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística, 2013, Brasília. Anais... Brasília: FAU - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2013.

CAMPOS, A.; CAMPOS, F. C. Incorporação de resíduos sólidos urbanos em tijolos solo-cimento: processos e cura, *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 40, n. 1, p. 73-86, 2019.

ESTABRAGH, A.; JAHANI, A.; JAVADI, A.; BABALAR, M. Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. *International Journal of Pavement Engineering*, To link to this article: <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736293>, 2020.

FRAGA, Y. S., BARBOSA, A. Q., DORTAS, I. S., SANTOS, L. H., & MOTA., W. V. Tecnologia Dos Materiais: A Utilização do Tijolo de Solo-Cimento na Construção Civil. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, p. 11-24, 2016.

HIDALGO, C.; CARVAJAL, G.; MUÑOZ, F. Laboratory Evaluation of Finely Milled Brick Debris as a Soil Stabilizer. *Sustainability*, v.11, n°967, 2019.

REIS, L. R. M.; Use of Waste from Construction and Demolition in the Manufacture of Soil-Cement Bricks: A Sustainable Alternative. *Materials Science Forum*, v.930, pg. 137-141, 2018.

SEGANTINI, A. A. S.; WADA, P. H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. *Acta Scientiarum*, v. 2, p.179-183, outubro 2011.

SILVA, V. M., GÓIS, L. C., & DUARTE., J. B. Incorporation of Ceramic Waste into Binary and Ternary Soil-Cement Formulations for the Production of Solid Bricks. *Materials Research*, v. 17, p. 326-331, 2013.

SILVA, J. P. S. *Mecânica dos Solos*. 2015. 204 f. Apostila - Universidade Federal do Tocantins. Curso de Engenharia Civil, 2015.

SOUZA, M. L. 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, p. 205-212, setembro 2008.

6 CONCLUSÃO GERAL

Face ao exposto, conclui-se que o solo-cimento é uma excelente matriz para o aproveitamento dos resíduos da construção civil, sendo eles mistos, recolhidos em caçambas, sem separação de material, resíduos de concreto e material cerâmico. A substituição de solo por resíduos na fabricação de tijolos de solo-cimento pode ser feita em até 40% de resíduos em relação à massa de solo, sem prejuízos para a qualidade do produto final.

O solo utilizado na confecção dos tijolos da presente pesquisa tem características argilosas, e a substituição de 20 e 40% de sua massa por resíduos da construção civil o tornou mais arenoso e mais propício para a mistura solo-cimento. Todos os traços estudados com substituição de solo por resíduos atenderam plenamente às especificações das normas brasileiras.

Entre os resíduos da construção civil, os tijolos com resíduos mistos em sua composição apresentaram melhores resultados de resistência à compressão, em comparação com os outros analisados. Esta forma é a mais viável, já que utiliza maior quantidade de materiais de descarte em sua composição, e menos processos são envolvidos para obtenção de melhores resultados.

Em geral, as propriedades estudadas do solo e do solo-cimento apresentaram melhorias sensíveis com resíduos de concreto, de material cerâmico e misto na confecção de tijolos, constituindo uma alternativa para o reaproveitamento destes resíduos, reduzindo o volume descartado na natureza.