

JAQUELINE ARICE GAUDENCIO DA SILVA

**Avaliação experimental de tijolos ecológicos visando
sua aplicação em construções sustentáveis**

JAQUELINE ARICE GAUDENCIO DA SILVA

**Avaliação experimental de tijolos ecológicos visando
sua aplicação em construções sustentáveis**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá - SP
2018

S586a	Silva, Jaqueline Arice Gaudencio da Avaliação experimental de tijolos ecológicos visando sua aplicação em construções sustentáveis / Jaqueline Arice Gaudêncio da Silva – Guaratinguetá, 2018. 42 f. : il. Bibliografia : f. 40-42 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza 1. Tijolos. 2. Solo-cimento. 3. Sustentabilidade. 4. Construção civil. I. Título. CDU 691.421
-------	---

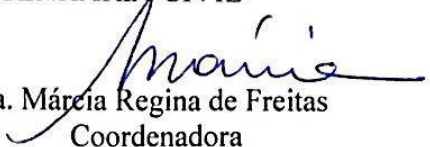
Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

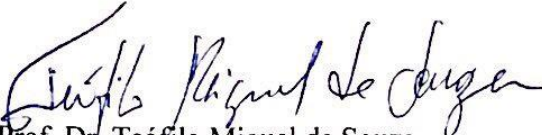
JAQUELINE ARICE GAUDENCIO DA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Prof. Dra. Márcia Regina de Freitas
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Orientador/Unesp/FEG


Profa. Dra. Isabel Cristina de Barros Trannin
Unesp-FEG


Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil
Unesp/FEG

Novembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todas as oportunidades que me foram dadas. Agradeço à minha família e principalmente aos meus pais, Eliana e Nelson, que sempre me deram todo o suporte e me ajudaram na construção de quem sou hoje.

Ao meu orientador Teófilo, que me ensinou muito, me mostrou novos horizontes, também sempre me incentivou e esteve à disposição para qualquer ajuda que eu necessitasse. Grande parte deste estudo foi possível graças ao seu auxílio.

À instituição, UNESP de Guaratinguetá, e todos os professores que contribuíram para formação de meu conhecimento durante minha vida acadêmica.

Ao Flávio, técnico do Departamento de Engenharia Civil UNESP – Guaratinguetá, pela ajuda em todos os ensaios e pelo companheirismo e bom humor de sempre.

Ao Luiz, à empresa ECO REAL TIJOLOS e seus profissionais que nos cederam os materiais e a atenção necessária durante todo o processo da pesquisa.

E por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse possível conjuntamente com a conclusão desta fase de minha vida.

"Quando o mundo estiver unido na busca do conhecimento, e não mais lutando por dinheiro e poder, então nossa sociedade poderá enfim evoluir a um novo nível."

Le Livros

RESUMO

O tijolo ecológico constitui uma alternativa bastante interessante para amenizar os impactos ambientais gerados pela construção civil e diminuir o déficit habitacional, pois possibilita diminuição de custos, menor consumo de materiais e, portanto, uma construção mais sustentável. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as características e propriedades de tijolos ecológicos produzidos com três tipos de solo, por meio da caracterização física, química e mineralógica dos solos e mecânica dos tijolos ecológicos. Além da avaliação dos tijolos, o trabalho também visa divulgar o emprego da técnica solo-cimento, como alternativa de construção sustentável. Os resultados obtidos evidenciaram a possibilidade da fabricação de tijolos utilizando a técnica de solo-cimento, com a utilização de diferentes tipos de solo. Os tijolos produzidos com os três solos avaliados atenderam a maioria dos padrões e requisitos especificados em norma e podem ser aplicados em construções que buscam atender ao conceito de sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cimento. Construção Civil. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The ecological brick is an interesting alternative to soften the environmental impacts generated by the construction and reduce the housing deficit, because it allows for lower costs, less material consumption and, therefore, a more sustainable construction. This work had the objective of evaluating the characteristics and properties of ecological bricks produced with three types of soil, through the physical, chemical and mineralogical characterization of soils and the mechanics of ecological bricks. In addition to the evaluation of the bricks, the work also aims to promote the use of the soil-cement technique as an alternative to sustainable construction. The results obtained evidenced the possibility of brick fabrication using the soil-cement technique, with the use of different types of soil. The bricks produced with the three evaluated soils have met most of the standards and requirements specified in the standard and can be applied to buildings that seek to meet the concept of sustainability.

KEYWORDS: Soil-cement. Construction. Sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Solos utilizados na confecção dos tijolos ecológicos: Cambissolo, Neossolo Flúvico e Latossolo (da esquerda para a direita).	11
Figura 2 – Série padrão de peneiras, com abertura de malha de 4,80; 2,00; 1,13; 0,60; 0,425; 0,15 e 0,075 mm, utilizada para a análise granulométrica dos solos.....	12
Figura 3 – Equipamentos e materiais utilizados nos ensaios para determinação dos limites de liquidez e de plasticidade dos solos.	14
Figura 4 – Três tipos de tijolos ecológicos, produzidos a partir de três tipos de solo da região do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo – Cambissolo, Neossolo Flúvico e Latossolo – da esquerda para a direita.	15
Figura 5 – Secagem das seis amostras de cada tipo de tijolo estudado, em estufa sob temperatura entre 105 °C a 100 °C..	17
Figura 6 – Imersão em água das seis amostras de cada tipo de tijolo estudado.	17
Figura 7 – Ensaio de compressão dos tijolos ecológicos.....	18
Figura 8 – Tijolos assentados com cola PVA branca sendo preparados para o ensaio de compressão simples.	18
Figura 9 – Micrografias e respectivos difratogramas da amostra de Neossolo Flúvico.....	21
Figura 10 – Micrografias e respectivos difratogramas da amostra de Cambissolo.	21
Figura 11 – Micrografias e respectivos difratogramas da amostra de Latossolo.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação da fração granulométrica com o respectivo diâmetro equivalente	06
Tabela 2 – Relações moleculares de diferentes tipos de argila.	07
Tabela 3 – Propriedades das classes granulométricas dos constituintes minerais dos solos...	07
Tabela 4 – Tipos de tijolos de solo-cimento encontrados no mercado brasileiro.....	09
Tabela 5 – Limites estabelecidos pela NBR 8492/2012, para tijolos de solo-cimento.	16
Tabela 6 – Análise granulométrica dos solos utilizados para a confecção dos tijolos ecológicos.	19
Tabela 7 – Limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade dos solos.	19
Tabela 8 – Classes de consistência relacionadas ao índice de plasticidade dos solos.....	20
Tabela 9 – Percentual em peso dos elementos identificados em cada solo, obtido no ensaio de microscopia eletrônica de varredura e energia dispersiva de raios-X.	23
Tabela 10 – Percentual em massa de óxidos presentes nos solos, obtido pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X.....	23
Tabela 11 – Valores médios de absorção de água dos tijolos ecológicos, com 28 dias de cura.	24
Tabela 12 – Valores médios de resistência à compressão dos tijolos com 28 dias de cura, sem assentamento e com assentamento de cola PVA branca..	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
EDS	Energia Dispersiva
EEL	Escola de Engenharia de Lorena
FRX	Fluorescência de Raios-X
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PVA	Poliacetato de Vinila
SP	São Paulo
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	centímetro
g	grama
keV	quilo elétrons-volt
kgf	quilograma-força
MPa	megapascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	SOLOS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS.....	3
3.2.	CIMENTO PORTLAND.....	8
3.3.	TIJOLOS ECOLÓGICOS	8
4	MATERIAIS E MÉTODOS	11
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS USADOS NA PRODUÇÃO DOS TIJOLOS	11
4.2	FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS	15
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MICROESTRUTURAL DOS SOLOS.....	19
5.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS	24
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades de maior importância social e econômica, ao mesmo tempo em que ocupa posição de destaque entre as que mais impactam o ambiente, devido ao elevado consumo de recursos naturais não renováveis, geração de grandes volumes de resíduos e transformação do ambiente original.

A busca por amenizar os impactos ambientais gerados pela construção civil e por diminuir o déficit habitacional, tem estimulado o resgate de técnicas e materiais de construção, que além de atender à demanda da sociedade possam ser mais sustentáveis. Para cumprir com esses objetivos, a tecnologia utilizada deve proporcionar a racionalização dos recursos, a diminuição dos custos e promover o aproveitamento de materiais e mão-de-obra local (SANTOS *et al.*, 2007). Assim, a criatividade em aliar técnicas tradicionais com a tecnologia moderna, aplicando materiais, que antes eram “subprodutos” da construção, pode resultar em soluções sustentáveis.

Neste aspecto, a utilização de tijolos ecológicos, também conhecidos como tijolos de solo-cimento, é muito interessante, pois é uma técnica que, segundo Ferreira (2015), oferece vantagens como: a) o processo de fabricação não necessita de combustível fóssil e dispensa queimas; b) os furos funcionam como câmaras termo acústicas; c) os custos relacionados a transporte e fabricação do material são eliminados, uma vez que pode ser produzido com o solo local ou solos caracterizados como subprodutos da construção civil; d) dispensa o uso de muitos equipamentos e mão-de-obra especializada na sua fabricação; e) ocorre diminuição de entulho na construção, já que os tijolos apresentam furos maiores que os tijolos tradicionais, que podem ser usados como passagens para instalações elétricas e hidráulicas (evitando quebras de paredes), além disso, tijolos quebrados podem ser moídos e reaproveitados. Os furos também podem ser embutidos de forma fácil e rápida nas colunas de sustentação, dispensando o uso excessivo de formas de madeira; f) ocorre racionalização de recursos na execução da alvenaria, uma vez que os tijolos são encaixáveis, autotravados e dispensam revestimento. Embora existam relatos que comprovem a possibilidade de uso de tijolos de solo-cimento, é preciso que estes materiais sejam produzidos com critérios de qualidade para que atendam as normas da ABNT, como a NBR 10.833/2012 e NBR 10.834/2012.

Neste trabalho foram avaliados os tijolos ecológicos fornecidos pela empresa Eco Real Tijolos, como sede em Lorena (SP), produzidos com a técnica de solo-cimento, utilizando três tipos de solo coletados na região do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral, avaliar as propriedades e características de tijolos ecológicos, utilizando três tipos de solo, quanto ao atendimento dos requisitos estabelecidos pela norma NBR 10834 (ABNT, 2012c) da ABNT para bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as características físicas dos solos por meio de ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade;
- Caracterizar química e mineralogicamente os solos por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à espectrometria de Energia Dispersiva (EDS) e de Fluorescência de raios-X (FRX);
- Analisar as características físico-mecânicas dos tijolos por meio dos ensaios de absorção d'água e de compressão simples, visando o atendimento de normas vigentes;
- Além da avaliação do material, o trabalho também visa divulgar a viabilidade do emprego da técnica solo-cimento como solução sustentável para a construção civil.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOLOS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS

Segundo Ortigão (2007) a definição de solo varia de acordo com quem o utiliza e para o engenheiro civil:

“os solos são um aglomerado de partículas provenientes de decomposição da rocha, que podem ser escavados com facilidade, sem o emprego de explosivos, e que são utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas”(ORTIGÃO, 2007, 3 ed., p. 13).

Como matéria-prima para a construção civil o solo tem grande importância, devido à abundância e o fácil acesso. O solo, chamado de terra crua, é utilizado como material de construção desde o início das primeiras sociedades agrícolas, que surgiram entre 12.000 a 7.000 a.C. Também há exemplos de inúmeros casos de construções em terra, que executadas há alguns milhares de anos conseguiram chegar ao século XXI, tal como a Grande Muralha da China (MATOS, 2012). A técnica de construção utilizando o solo foi sendo aprimorada pelos seres humanos e a fabricação de blocos com a tecnologia do solo-cimento é um exemplo deste aperfeiçoamento.

Estudos de solo, para diferentes finalidades, vêm sendo executados por diversos órgãos governamentais e particulares; tendo como requisito para a execução desses estudos a adoção de conceitos e critérios do Centro Nacional de Pesquisa de Solos – CNPS, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), o solo que classificamos é uma coleção de corpos naturais, constituída por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicas, formado por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contendo matéria viva e pode ser vegetado na natureza onde ocorre e, eventualmente, ter sido modificado por interferências antrópicas.

De acordo com IAC/Embrapa (1999) as principais classes de solos encontradas na região do Vale do Paraíba são: Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos, descritos a seguir conforme Embrapa (2006).

Os Argissolos são solos bem desenvolvidos, diferenciando dos Latossolos por apresentar um gradiente de textura em profundidade, como consequência de acúmulo de argila dos horizontes superiores. São solos que apresentam horizonte B textural, com argila de atividade baixa. Geralmente são profundos, no entanto, na região Semi-Árida podem ser rasos e pouco profundos. Este gradiente de textura denota ao solo diferentes classes de drenagem

interna, fazendo com que estes solos sejam susceptíveis a erosão hídrica. A coloração do horizonte B depende das condições de drenagem interna do solo, bem como, do tipo e quantidade de óxidos de ferro e alumínio presentes.

Os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos, com horizonte B do tipo incipiente ou câmbico (em formação), nos quais, os processos genéticos não se aprofundaram suficientemente para produzir um horizonte B com estrutura, cor e outras propriedades desenvolvidas que caracterizam um horizonte diagnóstico das outras classes de solos. Na Região Semi-Árida, esses processos ainda não destruíram as principais reservas minerais oriundas do material de origem, o que permite uma distinção dos Latossolos, pois estes não apresentam materiais primários na massa do solo. Quanto a textura, são solo que não apresentam variações de textura entre o horizonte A e o B, característica esta, que permite uma distinção com a classe dos Argissolos. Quanto à profundidade, encontramos desde solos rasos até profundos. A textura dos Cambissolos varia de média a argilosa.

Os Latossolos são solos com horizonte B latossólico, profundos, de coloração avermelhada, alaranjada ou amarelada, muito profundos, friáveis, porosos, de textura variável, com argila de atividade baixa (Tb). São solos fortemente intemperizados. Neles os minerais primários pouco resistentes ao intemperismo, bem como a fração silte, estão ausentes ou existem em pequenas proporções e os teores de óxidos de ferro e alumínio são elevados. A cor destes solos é variável em função da quantidade e do tipo de óxidos de ferro presentes. São solos que por serem bastante intemperizados apresentam uma morfologia muito uniforme ao longo do perfil, apresentando transição entre os horizontes difusa, com um pequeno escurecimento mais visível no horizonte superficial devido a presença da matéria orgânica.

Os Neossolos são solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso (menos de 50 cm) com pequena expressão dos processos pedogenéticos em consequência da baixa intensidade de atuação destes processos, que não conduziram, ainda a modificações expressivas do material originário, de características do próprio material, pela resistência ao intemperismo ou composição química, e de relevo, que podem impedir ou limitar a evolução destes solos. Os Neossolos dividem-se em:

- Neossolos Flúvicos: são solos desenvolvidos de sedimentos recentes, geralmente de origem fluvial, constituído de camadas alternadas e, frequentemente, de classes texturais distintas (dependente do depósito aluvial transportado), sem guardar correspondência pedogenética, entre si. Apresenta um horizonte A, assentado diretamente sobre um horizonte C, constituído por estratos de depósitos sedimentares.

- Neossolos Regolíticos: são solos jovens de textura arenosa, pouco profundos (< 100 cm e > 50 cm) a profundos, com sequência de horizontes A/C, com teores de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo superiores a 4% (principalmente feldspatos) nas frações areia e cascalho. São solos excessivamente bem drenados, podendo apresentar horizontes endurecidos em alguma parte do C, denominados de fragipã e/ou duripã.
- Neossolos Litólicos: São solos jovens, rasos (inferior a 50 cm de profundidade), de textura, siltosa, arenosa, média ou argilosa. Apresenta sequência de horizontes A, R ou A, C (geralmente de pequena espessura) e R. Em geral ocorre em rampas muito inclinadas, áreas de relevo montanhoso, existindo também nas regiões semi-áridas em relevos planos. Estes solos encontram-se quase sempre associados a Afloramentos de rocha.
- Neossolos Quartzarênicos: esta classe abrange solos de textura arenosa, essencialmente quartzosos (o que difere da classe dos Neossolos Regolíticos), muito profundos, com sequência de horizontes A/C, excessivamente drenados, forte a excessivamente ácidos e de baixa fertilidade natural.

Os Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50 cm a partir da superfície do solo, ou a profundidade maior que 50 cm e menor ou igual a 150 cm desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Não apresentam horizonte vértico em posição diagnóstica para Vertissolos ou textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico ou lítico fragmentário. Horizonte plânico, horizonte plântico, horizonte concrecionário ou horizonte litoplântico, se presentes, devem estar à profundidade maior que 200 cm a partir da superfície do solo.

Estas classes de solo apresentam características intrínsecas, que podem ser determinadas por meio de análises físicas, químicas e mineralógicas. Por exemplo, os ensaios para a determinação da granulometria dos solos fornecem as porcentagens das frações pedregulho, areia, silte e argila. As frações do solo são classificadas de acordo com seus diâmetros, conforme a escala granulométrica estabelecida pela NBR 6502 (ABNT, 1995), apresentada na Tabela 1.

A textura do solo corresponde à proporção de partículas classificadas de acordo com seu diâmetro e é um atributo físico importante, pois pode afetar muitas outras propriedades do solo. A textura é determinada pela porcentagem em massa das partículas, logo é o resultado do intemperismo sofrido pelos minerais da rocha-mãe e uma possível interferência de organismos vivos (ULLAH, 2012).

Tabela 1 – Relação da fração granulométrica com o respectivo diâmetro equivalente.

Fração Granulométrica	Diâmetro equivalente
Matacão	$200 < \varnothing \leq 1000 \text{ mm}$
Pedra de mão	$60 < \varnothing \leq 200 \text{ mm}$
Pedregulho	$2,0 < \varnothing \leq 60 \text{ mm}$
Pedregulho grosso	$20 < \varnothing \leq 60 \text{ mm}$
Pedregulho médio	$6,0 < \varnothing \leq 20 \text{ mm}$
Pedregulho fino	$20 < \varnothing \leq 2,0 \text{ mm}$
Areia	$0,06 < \varnothing \leq 2,0 \text{ mm}$
Areia grossa	$0,6 < \varnothing \leq 2,0 \text{ mm}$
Areia média	$0,2 < \varnothing \leq 0,6 \text{ mm}$
Areia fina	$0,06 < \varnothing \leq 0,2 \text{ mm}$
Silte	$0,002 < \varnothing \leq 0,06 \text{ mm}$
Argila	$\varnothing < 0,002 \text{ mm}$

Fonte: (ABNT, 1995).

A riqueza de um solo depende da composição química e mineralógica da rocha matriz (VIEIRA, 1988). Os minerais de maior granulometria nos solos são os que compõem a fração areia, constituída por minerais primários e fragmentos de rocha, que variam de acordo com a rocha de origem e são praticamente inertes, química e fisicamente. Essa fração arenosa pode ser constituída de areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina. A areia grossa é constituída fundamentalmente por minerais primários, como quartzo, feldspato, agregados de quartzo e argila e agregados de minerais de argila. E, tem como características, o fraco poder de retenção de água e substâncias dissolvidas, a elevada permeabilidade, a ausência de plasticidade, quando seca, se apresenta solta e incoerente e, quimicamente, é relativamente inerte. A areia fina apresenta propriedades intermediárias entre a areia grossa e o silte, sem sofrer variações bruscas.

Segundo Sampaio (2006), a fração silte é constituída por minerais primários de reduzida dimensão ($<0,02\text{mm}$); material ferruginoso e calcário; agregados de quartzo e argila; agregados de argila; minerais de argila. Essa fração tem como características, o baixo a médio poder de retenção de água; a dificuldade à penetração da água; a plasticidade quando úmida; sendo pouco ou nada pegajosa, relativamente tenaz quando seca e, praticamente inerte quimicamente, mas quando rica em material calcário e/ou ferruginoso é quimicamente ativa, podendo influenciar a reação do solo. A fração argilosa é constituída por minerais de argila e óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Os tipos de argila variam de acordo com as relações moleculares sílica/alumina (SiO_2/Al_3) e sílica/sesquióxidos [$(\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}_3))$], como pode ser observado na Tabela 2.

De acordo com Martins (2009) e Klamt e Meurer (2000), a gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) é o hidróxido de alumínio mais importante em solos, sendo encontrado abundantemente nos Latossolos brasileiros. Os óxidos de ferro, goethita (FeOOH), hematita (Fe_2O_3) e magnetita

(Fe_3O_4), são os mais comuns nos solos, sendo a goethita a forma mineral mais estável, formada em regiões de temperaturas mais baixas, enquanto a hematita é formada em climas quentes e úmidos, conferindo uma coloração avermelhada ao solo, graças ao seu poder de pigmentação. A magnetita pura é dificilmente encontrada na natureza e possui propriedades magnéticas (GADSDEN, 1975).

Tabela 2 – Relações moleculares de diferentes tipos de argila.

Tipo de argila	Relações moleculares	
	sílica/alumina SiO_2/Al_3	sílica/sesquióxidos $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$
Sialítica	> 2	> 2
Fersialítica	> 2	< 2
Ferralítica	< 2	< 2

Fonte: Sampaio (2006).

As características comuns aos diferentes tipos de argila são a elevada superfície específica, as propriedades coloidais, a elevada atividade química e capacidade de retenção de elementos nutritivos, além de conferirem alto poder de retenção de água e de agregação aos solos, são muito plásticas e pegajosas quando úmidas e apresentam alta tenacidade quando secas. Na Tabela 3 são apresentadas as principais propriedades das classes granulométricas dos constituintes minerais dos solos, relacionadas à capacidade de adsorção iônica, retenção de água, permeabilidade e propriedades mecânicas.

Tabela 3 – Propriedades das classes granulométricas dos constituintes minerais dos solos

Classe granulométrica	Adsorção de iônica	Retenção de água	Permeabilidade	Propriedades mecânicas
Argila	Forte	Forte	Fraca	Seco – tenaz Úmido – plástico e pegajoso
Silte	Fraca	Média	Fraca	Seco – pouco tenaz Úmido – plástico e pegajoso
Areia fina	Nula	Fraca	Forte	Seco – pouco tenaz e solto Úmido – pouco plástico
Areia grossa	Nula	Nula	Forte	Seco – solto Úmido – solto

Fonte: Sampaio (2006).

Com base nestes dados apresentados por Sampaio (2006), verifica-se que os solos arenosos, embora apresentem elevada permeabilidade, possuem baixa capacidade de retenção de água e adsorção de nutrientes para as plantas e são estruturalmente muito susceptíveis aos processos erosivos, por apresentarem baixa agregação. Por outro lado, os solos argilosos possuem baixa permeabilidade e elevada capacidade de retenção de água e nutrientes e, devido a melhor agregação, são mais resistentes aos processos erosivos que os solos arenosos.

3.2. CIMENTO PORTLAND

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland:

“O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais.”
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002, 7 ed., p.5)

Como material componente do tijolo solo-cimento, vê-se a necessidade do entendimento de algumas de suas propriedades, principalmente relacionadas ao processo de hidratação do mesmo, assim como os produtos e fatores constituintes dessas reações químicas que ocorrem quando o cimento é misturado com a água.

Logo no início do processo de hidratação do cimento, começa uma troca de espécies iônicas entre os sólidos e a fase líquida. Na fase líquida tem-se uma concentração de aluminatos, sulfatos e álcalis, e as maiores concentrações, são (JAWED *et al.*, 1983):

- Silicatos de cálcio (C_3S e C_2S): Ca^{2+} e OH^- ;
- Aluminatos de cálcio (C_3A) e ferritas (como C_4AF): Ca^{2+} e $Al(OH)_4^-$;
- Sulfato de cálcio ($CaSO_4$): Ca^{2+} e SO_4^{2-} ;
- Sulfatos alcalinos (Na_2SO_4 e K_2SO_4): Na^+ , K^+ e SO_4^{2-} .

Sendo assim, ao se hidratar o cimento são produzidos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxidos de cálcio (CaOH) e sulfoaluminato de cálcio (Etringita), que permitem o desenvolvimento da resistência mecânica do cimento. Quando não incorporados a outros componentes, os íons alcalinos permanecem na solução, tornando esse ambiente alcalino e favorecendo o ataque do Si pelas hidroxilas (VALDUGA, 2002).

Alguns ataques de causas químicas podem ocorrer devido à interação dos constituintes da pasta de cimento e agentes externos, tais como os agregados. Por isso, neste trabalho, vê-se a necessidade do estudo dos componentes químico-mineralógicos dos solos utilizados na fabricação dos tijolos.

3.3. TIJOLOS ECOLÓGICOS

O tijolo ecológico, também denominado de tijolo solo-cimento, diferentemente dos tijolos convencionais feitos de argila, não necessitam de queima, evitando o consumo de madeira ou combustíveis fósseis e assim contribuindo para a não poluição do ambiente (MOTTA *et al.*, 2014). Este tijolo se originou da mistura entre solo, cimento e ligante hidráulico conforme técnicas específicas. Segundo Einteiche (1957), esse processo físico-

químico consiste na estabilização e reorientação das partículas do solo devido à presença de material cimentante nos espaços intergranulares.

A consistência do solo e sua estabilização, são propriedades que fazem variar a proporção de cimento, geralmente de 5% a 10%. Essa massa é colocada em moldes, de prensas manuais ou hidráulicas, e compactada. Após a compactação, os tijolos passam pelo processo de cura, em que permanecem em ambiente úmido, sem vento e sem sol, sendo umedecidos periodicamente durante um período de 7 dias, a fim de que o bloco obtenha máxima resistência. Esses cuidados são necessários para que o tijolo não perca água rapidamente, e assim haja tempo do ligante hidráulico reagir com o cimento, fazendo com que o bloco ganhe a resistência necessária.

As principais normas brasileiras existentes para a especificação da fabricação dos blocos de solo-cimento são:

- NBR 10833/2012 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento;
- NBR 10834/2012 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos.

No mercado brasileiro da construção civil são encontrados diversos tipos de tijolos ecológicos, com modelos e tamanhos variados e sua utilização visa atender as necessidades específicas de cada projeto, mão-de-obra, equipamentos e materiais disponíveis (Tabela 4).

Tabela 4 – Tipos de tijolos de solo-cimento encontrados no mercado brasileiro.

Tipo	Dimensão	Características
Maciço comum	5 x 10 x 20 cm 5 x 10 x 21 cm	Assentamento com consumo de argamassa similar aos tijolos maciços comuns.
Maciço com encaixes	5 x 10 x 21 cm 5 x 10 x 23 cm	Assentamento com encaixes com baixo consumo de argamassa.
½ tijolo com encaixe	5 x 10 x 10,5 cm 5 x 11 x 11,5 cm	Elementos produzidos para que não haja quebra na formação dos aparelhos com juntas desencontradas.
Tijolos com dois furos e encaixes	5 x 10 x 20 cm 6,25 x 12,5 x 25 cm 7,5 x 13 x 30 cm 5 x 10 x 10 cm	Assentamento a seco, com cola branca ou argamassa bem plástica. As tubulações passam pelos tubos verticais.
½ tijolo com furo e encaixe	6,25 x 12,5 x 12,5 cm 7,5 x 15 x 15 cm	Elementos produzidos para acertar os aparelhos, sem a necessidade de quebras.
Canaletas	5 x 10 x 20 cm 6,25 x 12,5 x 25 cm 7,5 x 15 x 30 cm	Elemento empregado para a execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagens de tubulações horizontais.

Fonte: Pisani (2007).

De acordo com Ferreira *et al.* (2018), uma vantagem dos blocos ecológicos de solo-cimento é a possibilidade da incorporação de resíduos em sua composição, sendo assim, composto por uma maior porcentagem de solo e uma porcentagem de cimento com

proporções variadas. Os resíduos, quando incorporados à composição desses tijolos, resultam em uma variação das propriedades mecânicas, físicas e térmicas e, por isso, exigem análises laboratoriais. Este autor relata que os principais resíduos orgânicos incorporados atualmente nos tijolos ecológicos são cascas de ovos ou cinzas, cascas de arroz, bagaço de malte, de cana-de-açúcar, cinzas de caldeira, resíduos da indústria do papel, resíduos de madeira e lixo orgânico depositado em aterros. Estes resíduos devem ser secos para que sua umidade não interfira na umidade ótima dos tijolos e alguns devem ser triturados.

Além dos resíduos orgânicos, podem ser reaproveitados também resíduos de construções, indústrias, entre outros. Esses rejeitos, que seriam descartados, se tornam matérias primas para tijolos ecológicos, tais como: resíduos de vidro pulverizado, resíduos lignocelulósicos provenientes da indústria de base florestal, rejeitos oriundos de indústrias, fibra de bananeira, resíduo de granito proveniente do desdobramento de blocos de rochas ornamentais, entre outros (MORAIS *et al.*, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS USADOS NA PRODUÇÃO DOS TIJOLOS

Os três solos selecionados para este estudo foram obtidos de diferentes locais, na região do vale do Paraíba (SP), e classificados de acordo com suas características intrínsecas, descritas pela Embrapa (2006), sendo considerado o local de ocorrência, a cor e a textura. O Cambissolo foi fornecido por uma usina de areia da região de Queluz – SP. O Neossolo flúvico foi retirado de um aterro no próprio local da fábrica “Eco Real Tijolos”, na cidade de Lorena – SP, que fabricou os tijolos de solo-cimento. O Latossolo foi retirado de áreas particulares, na cidade de Guaratinguetá – SP (Figura 1).

Figura 1 – Solos utilizados na confecção dos tijolos ecológicos: Cambissolo, Neossolo Flúvico e Latossolo (da esquerda para a direita).



Fonte: Autora.

Os solos foram caracterizados fisicamente, por meio de análise granulométrica (ABNT, 2017b), de limite de liquidez (LL) (ABNT, 2017a) e limite de plasticidade (LP) (ABNT, 2016), realizadas no Laboratório de Mecânica de Solos, do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Unesp.

A determinação da morfologia e da composição química dos solos foi realizada usando as técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associado à espectrometria de Energia Dispersiva (EDS) e de Fluorescência de raios-X (FRX), nos laboratórios da Escola de Engenharia de Lorena (EEL) da Universidade de São Paulo (USP).

Caracterização física do solo

De acordo com a norma NBR 10833 (ABNT, 2012b) recomenda-se a utilização de solos que cumpram os seguintes requisitos: 1) 100% passante na peneira de abertura de malha 4,8 mm; 2) 10 a 50% passante na peneira de abertura de malha 0,075 mm; 3) Limite de liquidez menor ou igual a 45%; 4) Índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

Análise Granulométrica

Para a realização da análise granulométrica do solo, as amostras dos solos foram submetidas ao peneiramento em uma série-padrão de peneiras, com abertura de malha de 4,80; 2,00; 1,13; 0,60; 0,425; 0,15 e 0,075 mm e, em seguida, determinou-se a massa de material retido em cada peneira, conforme procedimento descrito pela NBR 7181/2017 (Figura 2).

Figura 2 – Série padrão de peneiras, com abertura de malha de 4,80; 2,00; 1,13; 0,60; 0,425; 0,15 e 0,075 mm, utilizada para a análise granulométrica dos solos.



Fonte: Autora.

Determinação dos limites de liquidez e de plasticidade do solo

Após a secagem das amostras foram realizados os ensaios para determinação do limites de liquidez dos solos seguindo os procedimentos descritos pela NBR 6459 (ABNT, 2017a). O ensaio visou determinar o limite de liquidez de cada amostra, ou seja, o teor de água que adicionado ao solo é capaz de causar perda de coesão de suas partículas (CAPUTO, 1988). Neste ensaio, conhecido por “Casa Grande”, coloca-se uma quantidade do material em um recipiente côncavo de porcelana e aos poucos se adiciona água, mistura-se vigorosamente a fim de se obter uma homogeneidade da umidade do solo. A umidade deve ser próxima do

limite de plasticidade, que é estimada a partir da experiência do laboratorista. Passa-se o material para a concha do aparelho de Casagrande, preenchendo-a até 2/3 de sua superfície. Com uma espátula alisa-se o solo retirando-se o excesso até se obter uma espessura de aproximadamente 1 cm na parte central do recipiente côncavo (a espessura é confirmada pelo gabarito do cinzel). Faz-se uma ranhura no solo com o cinzel no sentido longitudinal do aparelho. Girando-se a manivela com velocidade constante de duas voltas por segundo, contando o número de golpes até o fechamento da ranhura numa extensão de 1 cm. Coleta-se uma quantidade de material do local onde ocorreu o fechamento (cerca de 20 g) e coloca-se numa cápsula para não perder umidade para o ambiente e, posteriormente, determina-se sua umidade. Volta-se o material para o recipiente de porcelana e adiciona-se mais água repetindo todo o processo por mais quatro vezes. O limite de liquidez é o teor de umidade no qual o solo fecha a ranhura com o impacto de 25 golpes.

Os ensaios para a determinação do limite de plasticidade dos solos foram realizados após a secagem das amostras e seguiu os procedimentos da NBR 7180 (ABNT, 2016). Nestes ensaios são determinados os teores de umidade abaixo dos quais os solos perdem a capacidade de serem moldados e passam a ficar quebradiços (CAPUTO, 1988). As amostras foram umedecidas e moldadas em cilindros de 3 a 4 mm de diâmetro. O limite de plasticidade do solo é aproximado quando esses cilindros passam a apresentar rachaduras quando moldados.

Após a determinação do limite de liquidez e o limite de plasticidade de cada solo, foi calculado o índice de plasticidade (IP), que corresponde ao intervalo de umidade em que o solo se mantém plástico e foi obtido pela equação (1):

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

onde:

IP = Índice de plasticidade;

LL = Limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade.

Na Figura 3 podem ser observados os equipamentos e materiais utilizados nestes ensaios.

Figura 3 – Equipamentos e materiais utilizados nos ensaios para determinação dos limites de liquidez e de plasticidade dos solos.



Fonte: Autora.

Caracterização morfológica e química dos solos

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS)

Para a caracterização dos solos por microscopia de varredura, foram usadas pequenas amostras dos três solos, colocadas sobre uma fita de carbono. As amostras foram irradiadas com um feixe de elétrons no MEV HITACHI TM3000, com sistema de microanálise EDS, do Laboratório de Microscopia da EEL/USP.

Esta técnica possibilita a investigação da morfologia da superfície de amostras com magnificações da ordem de centenas de milhares de vezes. Além disso, permite a realização de microanálises por Energia Dispersiva (EDS), que possibilita a identificação e mapeamento dos elementos químicos presentes no material. O princípio de realização de uma microscopia de varredura consiste na interação do material analisado com um feixe de elétrons que varre a superfície da amostra. As imagens podem fornecer informações referentes à topografia, à morfologia e à composição química, que pode ser determinada por EDS (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) aplicada ao solo

Foram feitas análises semiquantitativas sem padrões, com determinação de elementos químicos de flúor a urânio, das amostras dos três solos, utilizando fluorescência de raios-X (FRX), em equipamento Axios MAX, marca PANalytical, do Laboratório de Caracterização Química da EEL/USP. A análise por fluorescência de raios-X se baseia na excitação da amostra por partículas como elétrons, prótons ou íons, produzidos em aceleradores de

partículas ou ondas eletromagnéticas, e então é realizada a medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra (MELO JÚNIOR, 2007). A utilização desta técnica foi necessária, pois, permitiu a caracterização dos óxidos presentes nos solos estudados.

4.2 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS

Foram avaliados três tipos de tijolos ecológicos, produzidos a partir de três tipos de solo da região do Vale do Paraíba, Estado de São Paulo (Cambissolo, Neossolo Flúvico e Latossolo), apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Três tipos de tijolos ecológicos, produzidos a partir de três tipos de solo da região do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo – Cambissolo, Neossolo Flúvico e Latossolo – da esquerda para a direita.



Fonte: Autora.

A caracterização mecânica dos tijolos foi realizada por meio de ensaios de resistência à compressão e absorção d'água, conforme procedimentos das normas NBR 8492/2012 e NBR 10836/2013.

Inicialmente os solos foram preparados para a mistura, por meio de peneiramento em malha de 2 mm. Após esse processo, foram realizadas as misturas, seguindo o traço dos tijolos. Os tijolos em que foram utilizados os solos, Neossolo Flúvico e Cambissolo, foram confeccionados com traço 9:1 (9 partes de solo para 1 de cimento). Os tijolos produzidos com o Latossolo necessitaram de correção, sendo o solo misturado com uma porcentagem de areia, tendo então o traço de 7:2:1 (7 partes de solo para 2 de areia para 1 de cimento). Os agregados e o cimento foram colocados no misturador, sendo a água acrescentada gradativamente. Para cada 91 kg de solo, aproximadamente, foram adicionados 8 litros de água, porém essa quantidade pode variar, dependendo da umidade apresentada pelo solo.

Após todo esse processo, a mistura seguiu para a prensagem, executada em uma prensa hidráulica, da marca ECO Máquinas modelo 2600. A prensagem foi feita utilizando uma força de 3 toneladas. A dimensão dos três tipos de tijolos seguiu o padrão, 7,0 x 12,5 x 25,0 cm.

Posteriormente à prensagem, os tijolos seguiram para os pallets, onde passaram pelo processo de cura, durante o período de sete dias, sendo umedecidos uma vez por dia.

Caracterização físico-mecânica dos tijolos

Nos ensaios de caracterização físico-mecânica dos tijolos foram considerados os critérios e exigências da NBR 8492/2012, para o controle de qualidade, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites estabelecidos pela NBR 8492/2012, para tijolos de solo-cimento.

Característica	Exigências da NBR 8492/2012
Resistência à compressão	valor médio $\geq 2,0$ MPa valor individual $\geq 1,7$ MPa
Absorção de água	valor médio $\leq 20\%$ valor individual $\leq 22\%$

Fonte: (ABNT, 2012a).

Ensaio de absorção d'água

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual Paulista de Guaratinguetá, de acordo com a norma NBR 8492 (ABNT, 2012).

Foram utilizados seis tijolos de amostra (corpos de prova) de cada tipo de tijolo estudado, que foram secos em estufa em temperatura entre 105°C e 110°C (Figura 5). Após constância de massa, foram retirados e pesados quando atingiram temperatura ambiente, obtendo assim o valor de massa (M_1) em gramas.

Em seguida, os tijolos foram imersos em água durante 24 horas (Figura 6) e após esse período, foram retirados e secos superficialmente para uma nova pesagem, obtendo-se assim a massa (M_2) em gramas, dos tijolos saturados.

Os valores individuais de absorção d'água, em porcentagem, foram obtidos pela equação (2) a seguir.

$$A = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100\% \quad (2)$$

Em que:

A = absorção d'água (%);

M1 = massa do tijolo seco em estufa (g);

M2 = massa do tijolo saturado (g).

Figura 5 – Secagem das seis amostras de cada tipo de tijolo estudado, em estufa sob temperatura entre 105 °C a 100°C.



Fonte: Autora.

Figura 6 – Imersão em água das seis amostras de cada tipo de tijolo estudado.



Fonte: Autoria própria.

A absorção d'água média foi obtida pela média aritmética dos resultados individuais de cada um dos seis tijolos amostrais (corpos de prova) para cada tipo de tijolo avaliado.

Ensaio de compressão simples aplicado aos tijolos ecológicos

Este ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 10.836/2013 (ABNT, 2013). Foram utilizados dois tijolos em cada análise, colocando um em cima do outro, buscando obter melhor dissipação da carga aplicada e resultado mais próximo da realidade. Os tijolos (corpos de prova) foram colocados no centro do prato

inferior do equipamento de ensaio de compressão e a carga foi elevada uniformemente até a ruptura dos tijolos, sendo anotado o valor obtido em kgf (Figura 7).

Figura 7 – Ensaio de compressão dos tijolos ecológicos.



Fonte: Autora.

Foram realizados seis ensaios para cada tipo de tijolo, variando o assentamento entre os tijolos para averiguar possíveis interferências. Assim, a metade dos ensaios foi realizada sem assentamento, com os tijolos encaixados um sobre o outro, e a outra metade com assentamento de cola PVA branca (Figura 8).

Figura 8 – Tijolos assentados com cola PVA branca sendo preparados para o ensaio de compressão simples.



Fonte: Autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MICROESTRUTURAL DOS SOLOS

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, os solos utilizados para a confecção dos tijolos atenderam as características recomendadas pela NBR 10833/2012, com 100% passante na peneira de abertura de malha de 4,8 mm e 10% a 50% passante na peneira de abertura de malha 0,075 mm; exceto o Latossolo que apresentou 59,27% passante na peneira de abertura de malha 0,075mm, exigindo correção para a utilização na confecção dos tijolos de solo-cimento.

Tabela 6 – Análise granulométrica dos solos utilizados para a confecção dos tijolos ecológicos.

Solos	Diâmetro Médio das Partículas (mm)						
	4,80	2,00	1,13	0,60	0,425	0,15	0,075
	% passante						
Latossolo	100,00	99,93	98,54	90,26	80,03	63,91	59,27
Neossolo Flúvico	100,00	96,03	93,17	86,03	71,36	45,04	38,27
Cambissolo	100,00	97,66	94,04	85,00	81,51	65,59	49,80

Fonte: Autora.

Na Tabela 7 podem ser observados os resultados do limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP).

Tabela 7 – Limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade dos solos.

Solos	Limites		Índice de Plasticidade
	Liquidez	Plasticidade	
	% passante		
Latossolo	39,1	30,4	8,7
Neossolo Flúvico	22,3	15,1	7,2
Cambissolo	25,5	NP	NP

Fonte: Autora.

O resultado obtido para o Cambissolo foi de um solo não-plástico. O Latossolo e o Neossolo Flúvico foram caracterizados como solos medianamente plásticos, segundo a classificação de Jenkins (CAPUTO, 1988) apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Classes de consistência relacionadas ao índice de plasticidade dos solos.

Índice de Plasticidade	Classificação
1 – 7	Fracamente Plástico
7 – 15	Medianamente Plástico
>15	Altamente Plástico

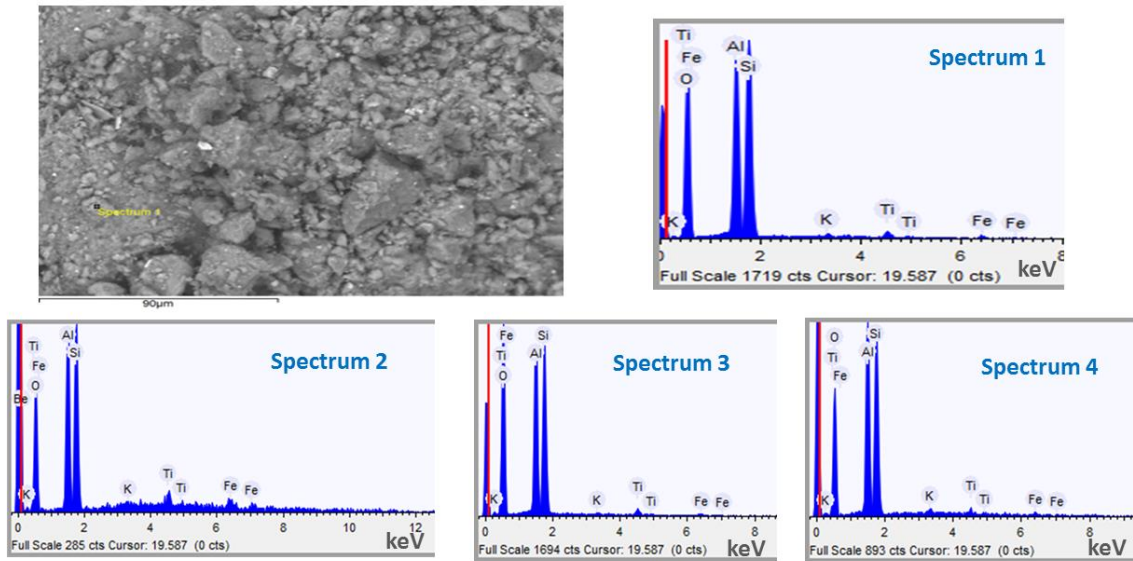
Fonte: Caputo (1988).

Com base nestes resultados, os três solos atenderam as características recomendadas pela 10834/2012, com limite de liquidez menor ou igual a 45% e índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

Em complementação às análises físicas, os solos foram caracterizados quanto à microestrutura e composição química por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à energia dispersiva (EDS) e também mediante ao uso da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).

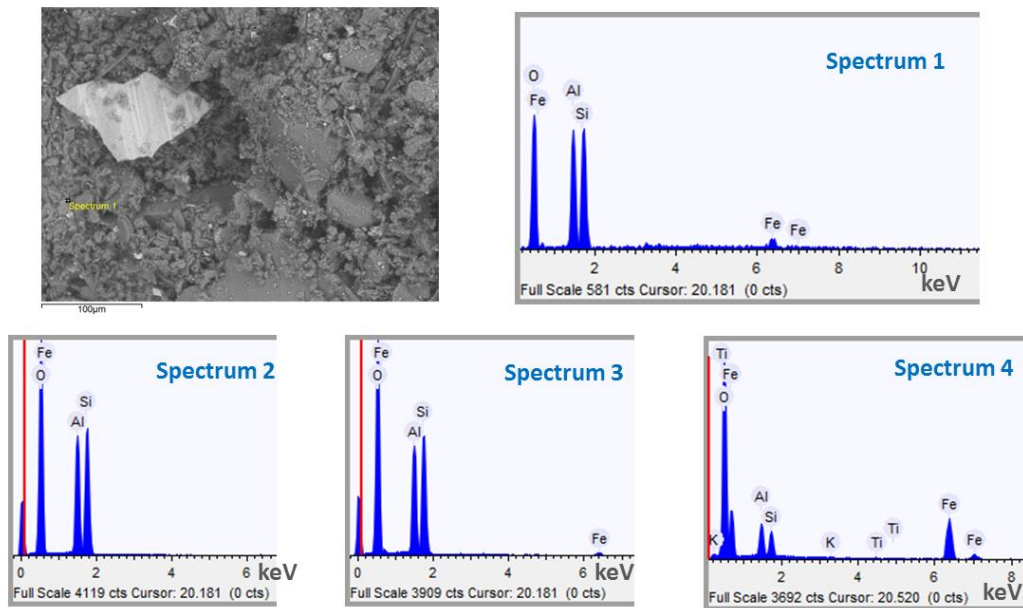
Com base na Figura 9, onde são apresentados a micrografia e os respectivos resultados de EDS do Neossolo Flúvico, foi possível verificar a presença de partículas maiores que as apresentadas pelo Cambissolo (Figura 10) e pelo Latossolo (Figura 11). Estes resultados são coerentes com a granulometria dos solos, uma vez que o Latossolo apresentou maior fração de material passante na 0,075 mm, sendo que o menor valor passante na malha 0,075mm, correspondeu ao Neossolo Flúvico. As micrografias também evidenciaram uma morfologia de partículas preferencialmente granulares para o Neossolo Flúvico e partículas placóides, características de argilominerais para o Cambissolo e o Latossolo, devido, provavelmente, ao fato do Neossolo Flúvico apresentar menor fração de argilominerais e maior fração de partículas arredondadas, que são características de minerais como o quartzo.

Figura 9 – Micrografias e respectivos difratogramas da amostra de Neossolo Flúvico.



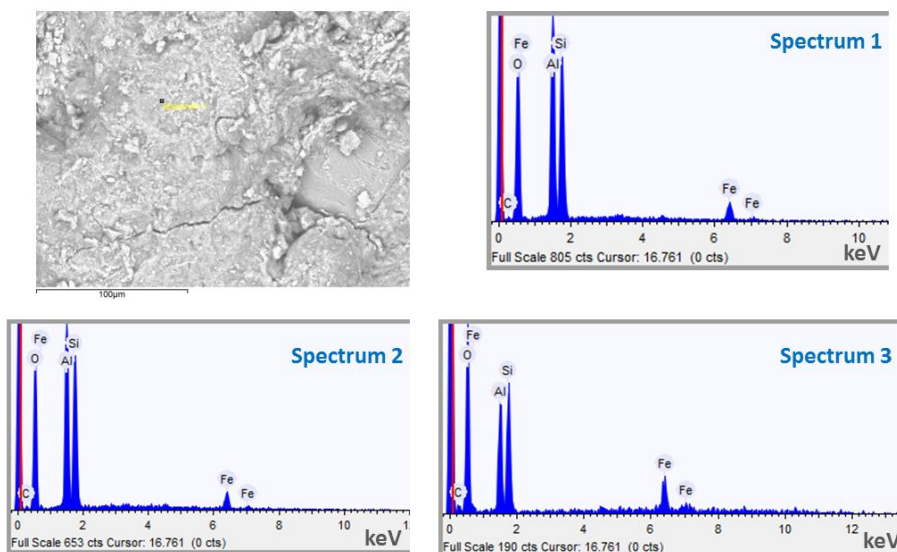
Fonte: Autora.

Figura 10 – Micrografias e respectivos difratogramas da amostra de Cambissolo.



Fonte: Autora.

Figura 11 – Micrografias e respectivos difratogramas da amostra de Latossolo.



Fonte: Autora.

Por meio das análises de EDS associadas à técnica de microscopia eletrônica de varredura foi possível identificar os elementos característicos dos argilominerais, principalmente na forma de aluminossilicatos hidratados. O EDS do Neossolo Flúvico apresentou, em vários pontos da amostra, os elementos Ti, K, Fe, Al e Si, cujas porcentagens podem ser observadas na Tabela 9. No Cambissolo foram identificados os elementos Fe, Al e Si, também mostrado na Tabela 9. No Latossolo foram encontrados os elementos Fe, Al e Si, ainda mostrados na Tabela 9. A principal diferença verificada entre os três solos foi o teor de Fe, que é elevado no Latossolo. Outra diferença entre os solos estudados foi a presença de titânio (Ti) em grande quantidade no Neossolo Flúvico. A literatura relata que o Ti é considerado um elemento imóvel devido à natureza relativamente insolúvel dos minerais em que ele faz parte, como o rutilo e o anatásio (TiO_2). No entanto, alguns estudos demonstram que o Ti pode ser móvel nas diferentes camadas do solo, ocorrendo perdas de Ti com os processos de lixiviação e translocação em condições tropicais. Além disso, em processos erosivos, minerais contendo Ti podem ser transportados e depositados em bacias sedimentares como pode ocorrer no Vale do Paraíba.

Um resultado interessante foi o baixo teor de elementos alcalino terrosos (sódio e potássio), que estão associados à durabilidade dos componentes da construção civil. Nos solos, Cambissolo e Latossolo, não foi identificado o K e o Neossolo Flúvico apresentou teores inferiores a 1%, o que assegura o uso na construção civil, sem prejuízo da durabilidade dos tijolos por ataque com álcalis.

Para determinar e quantificar os minerais e argilominerais presentes em cada um dos solos seriam necessárias análises de difratometria de raios-X, usando ferramentas auxiliares como o refinamento Ritveld e o programa Topas na versão acadêmica, que não foram realizadas por não serem objetivo deste trabalho.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do ensaio de microscopia eletrônica de varredura associado à energia dispersiva de raios-X, para os solos estudados.

Tabela 9 – Percentual em peso dos elementos identificados em cada solo, obtido no ensaio de microscopia eletrônica de varredura e energia dispersiva de raios-X.

Spectrum do Neossolo Flúvico	Al	Si	K	Ti	Fe
1	18,078	25,131	0,534	1,836	1,579
2	17,594	23,860	0,284	4,692	5,578
3	17,196	20,871	0,414	2,246	1,218
4	20,963	26,079	0,792	1,741	1,899
Spectrum do Cambissolo	Al	Si	K	Ti	Fe
1	16,939	21,383	-	-	9,760
2	14,533	19,214	-	-	0,692
3	14,015	18,524	-	-	2,750
4	5,065	3,889	0,214	0,412	37,853
Spectrum do Latossolo	Al	Si	K	Ti	Fe
1	18,435	19,170	-	-	11,541
2	18,579	19,295	-	-	12,321
3	10,406	13,448	-	-	18,286

Fonte: Autora.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), indicando que nos três solos o óxido majoritário foi o SiO₂ (sílica), sendo o maior percentual observado no Neossolo Flúvico.

Tabela 10 – Percentual em massa de óxidos presentes nos solos, obtido pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X.

Cambissolo		Neossolo Flúvico		Latossolo	
Composto	Concentração (%)	Composto	Concentração (%)	Composto	Concentração (%)
SiO ₂	79,50	SiO ₂	89,36	SiO ₂	73,31
Al ₂ O ₃	15,88	Al ₂ O ₃	7,94	Al ₂ O ₃	19,63
Fe ₂ O ₃	2,63	TiO ₂	0,87	Fe ₂ O ₃	5,51
K ₂ O	0,70	Fe ₂ O ₃	0,81	TiO ₂	0,91
TiO ₂	0,55	Cl	0,22	K ₂ O	0,25
MgO	0,17	K ₂ O	0,20	SO ₃	0,13
ZrO ₂	0,16	SO ₃	0,14	P ₂ O ₅	0,10
Cl	0,15	CaO	0,14	ZrO ₂	0,08
SO ₃	0,10	MgO	0,13	CaO	0,07
CaO	0,08	ZrO ₂	0,11	-	-
P ₂ O ₅	0,07	P ₂ O ₅	0,08	-	-

Fonte: Autora.

A presença de SiO_2 é essencial nos solos de forma que no processo de hidratação com o cimento, este óxido possa reagir com o CaO presente no cimento para formar os produtos de hidratação como o CSH, que fornecem resistência mecânica e dureza aos tijolos. Destes resultados pode-se inferir que, provavelmente, o Neossolo Flúvico pode formar maior quantidade de produtos de hidratação, o que é desejável para melhorar as propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cimento.

Os resultados obtidos pela técnica de fluorescência de raios-X foram coerentes com os dados de EDS, que evidenciaram baixos teores de elementos alcalinos. Pode-se observar que todos os solos apresentaram teores de K_2O abaixo de 1%, sendo que no Cambissolo foi verificado o menor teor.

5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS

Na Tabela 11 são apresentados os resultados do ensaio de absorção d'água com 28 dias de cura para os tijolos produzidos com diferentes tipos de solo. O cálculo da absorção média de água foi realizado pela média aritmética do valor individual das seis amostras de cada tipo de tijolo.

Tabela 11 –Valores médios de absorção de água dos tijolos ecológicos, com 28 dias de cura.

Tijolos	Nº de amostras	Valor individual $\leq 22\%$	Absorção Média de Água (%)
Latossolo – cimento – Areia	6	Sim, variou de 18,09 a 19,94	19,24
Neossolo Flúvico – cimento	6	Sim, variou de 12,73 a 14,25	13,28
Cambissolo – cimento	6	Sim, variou de 13,93 a 15,74	15,05

Fonte: Autora.

Todos os tijolos atenderam às especificações da norma NBR 8492 (ABNT, 2012a) que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e todos os valores individuais menores ou iguais a 22%. A maior média de absorção, de 19,24%, foi obtida pelo tijolo contendo Latossolo e a menor média, de 13,28%, foi apresentada pelo tijolo contendo Neossolo Flúvico.

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão aplicados aos tijolos com 28 dias de cura, sem assentamento e com assentamento de cola PVA branca. O cálculo da resistência à compressão média foi realizado pela média aritmética do valor individual de resistência à compressão obtido das três amostras de cada tipo de tijolo.

Tabela 12 – Valores médios de resistência à compressão dos tijolos com 28 dias de cura, sem assentamento e com assentamento de cola PVA branca.

Tijolos	Resistência à compressão de tijolos sem assentamento		
	Nº de amostras	Valor individual $\geq 1,7$ MPa	Resistência Média (MPa)
Latossolo – cimento – Areia	3	Sim, variou de 2,20 a 2,58	2,42
Neossolo Flúvico – cimento	3	Sim, variou de 2,78 a 3,23	3,02
Cambissolo – cimento	3	Sim, variou de 2,12 a 2,58	2,35
Resistência à compressão de tijolos com assentamento de cola PVA branca			
Latossolo – cimento – Areia	3	Sim, variou de 1,98 a 2,27	2,09
Neossolo Flúvico – cimento	3	Sim, variou de 2,60 a 2,83	2,72
Cambissolo – cimento	3	Sim, variou de 2,15 a 2,28	2,22

Fonte: Autora.

Analisando os resultados dos ensaios com os tijolos sem assentamento, as resistências médias não variaram muito, sendo que o tijolo contendo o Neossolo Flúvico foi o mais resistente à compressão, com resistência média de 3,02 MPa e o menos resistente, o tijolo contendo Cambissolo, cuja resistência média à compressão foi de 2,35 MPa.

As resistências médias dos tijolos assentados com cola PVA branca também variaram pouco, mas também nessa condição, a maior resistência à compressão foi apresentada pelo tijolo contendo Neossolo Flúvico, com resistência média de 2,72 MPa, mas o menos resistente à compressão nessa condição foi o tijolo contendo Latossolo, com resistência média de 2,09 MPa.

Um ponto importante a ser ressaltado foi a obtenção de maiores resistências à compressão quando os ensaios foram realizados com tijolos sem assentamento. Esse comportamento pode ser explicado pelas milimétricas diferenças dos encaixes entre os tijolos, devido às pequenas imperfeições e rugosidades causadas pela cola PVA branca, que podem promover a concentração de tensões durante a aplicação da carga (GRANDE, 2003).

Apesar destas diferenças entre os ensaios com tijolos sem assentamento e assentados com cola, os resultados obtidos para todos os tijolos foram satisfatórios, visto que os valores atenderam às especificações da norma NBR 8492 (ABNT, 2012a), que estabelece como mínimo, o valor médio de 2,0 MPa e todos os valores individuais maiores ou iguais a 1,7 MPa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em geral, os solos avaliados atenderam aos requisitos estabelecidos pelas normas relacionadas aos tijolos de solo-cimento, quanto granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade, exceto o Latossolo, cuja granulometria muito fina, exigiu correção para a confecção do tijolo ecológico, sendo necessária a adição de areia.

Os tijolos contendo Neossolo Flúvico e Cambissolo foram confeccionados com o traço 9:1 (9 partes de solo para 1 de cimento), enquanto os tijolos produzidos com o Latossolo, devido ao elevado teor de argila e óxidos de Fe deste solo, necessitaram de correção por meio da adição de areia, sendo o traço de 7:2:1 (7 partes de solo para 2 de cimento para 1 de areia).

A análise da microestrutura dos solos, reafirmou os resultados obtidos nas análises granulométricas, sendo verificada a presença de partículas maiores e mais arredondadas, típicas de minerais como o quartzo, presentes no Neossolo Flúvico, assim como a presença de partículas placóides, encontradas em argilominerais presentes no Latossolo e no Cambissolo.

Na análise química constatou-se baixo teor de elementos alcalinos terrosos nos três solos e alto teor de Fe no Latossolo e Ti no Neossolo Flúvico.

A espectrometria de fluorescência de raios-X evidenciou a predominância de SiO₂ nos três tipos de solo, com maior participação na composição do Neossolo Flúvico.

Todos os tijolos produzidos com os diferentes tipos de solo atenderam as especificações das normas brasileiras quanto à resistência à compressão e absorção d'água e podem ser utilizados como alternativa para a diminuição do impacto ambiental no ramo da construção civil.

Como sugestão para trabalhos futuros, o desenvolvimento de estudos da viabilidade econômica da construção com tijolos de solo-cimento em comparação aos tradicionais pode auxiliar na divulgação das vantagens obtidas com a aplicação dessa técnica e aumentar o interesse social em construções de moradias de baixo-custo, como construções habitacionais utilizando esses materiais.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.a
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017b
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro, 2012b
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2012c
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10836**: bloco de solo-cimento sem função estrutural: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)
- CAPUTO, H. P., **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. São Paulo: Editora LTC, 1988. 234 p.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- EINTEICHE, Augusto. **Suelo-semento: su aplicacion em la edificacion**. Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento (CINVA). Santa Fé de Bogotá, Colômbia, 1957.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- FERREIRA, A. D. D., **Habitação de interesse social: aspectos históricos, legais e construtivos**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015. 160 p.
- FERREIRA, D.; LUSO, E.; CRUZ, M. Blocos ecológicos de solo-cimento com incorporação de resíduos. In: REHABEND CONGRESS, Cáceres, 2018. **Anais...** Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança Instituto Politécnico de Bragança, 2018.

GADSDEN, J. A. **Infrared spectra of minerals and related inorganic compounds**. Chichester, Butterworth, 1975. 277p.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS/EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – IAC/EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

JAWED, I; SKALNY, J; YOUNG, J. F. Hydratation of Portland cement. In: BARNES, P. (Ed). **Structure and performance of cement**. Essex: Applied Science Publishers, 1983. p. 237-318.

KLAMT, E; MEURER, J. In: **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 174p.

MARTINS, T. **Caracterização mineralógica e da matéria orgânica do solo por técnicas espectroscópicas e DRX**. Ponta Grossa: [S.n], 2009. 177p.

MATOS, A. C. **Uso da terra crua em blocos de terra compactada**. 2012. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido/UFERSA. 2012.

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron**. 2007. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MORAIS, M. B.; CHAVES A. M.; JONES, K. M. Análise de viabilidade de aplicação do tijolo ecológico na construção civil contemporânea. **Revista Pensar Engenharia**, v.2, n. 2, 2014.

MOTTA, C. J.; MORAIS, W. P.; ROCHA, N. G. **Tijolo de solo cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis**. Belo Horizonte: E-xata, 2014. 13-26 p.

ORTIGÃO, J. A. R., **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. Terratek, 2007. 389 p.

PISANI, J. M. **Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo cimento**. São Paulo: Sinergia, 2007. 6-59 p.

SAMPAIO, E. **Mineralogia do solo**. Évora: Departamento de Geociências, Universidade de Évora, 2006, 21p.

SANTOS, H. P. et al. **Avaliação experimental de tijolos de solo-cimento**. Campo Grande: ELECS, 2007. p. 552-561.

ULLAH, H. **Estudo calorimétrico da influência de xenobióticos na atividade microbiana de alguns solos cultivados por algodão.** Campinas, 2012. 130p.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado:** mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo. 2002. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

VIEIRA, L.S. **Manual da ciência do solo:** com ênfase aos solos tropicais. 2. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1988. 464p.