



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

VITOR VEZZARO DE PAULA

**Comportamento de tijolos de solo-cimento com adição de escória de alto-forno a
esforços de compressão**

Guaratinguetá - SP

2017

VITOR VEZZARO DE PAULA

Comportamento de tijolos de solo-cimento com adição de escória de alto-forno a esforços de compressão

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

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Ramírez Gil

Guaratinguetá - SP

2017

P324c Paula, Vitor Vezaro de
Comportamento de tijolos de solo-cimento com adição de escória de alto-forno a esforços de compressão / Vitor Vezaro de Paula – Guaratinguetá, 2017.
49 f. : il.
Bibliografia: f. 40-43

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Ramírez Gil

1. Tijolos. 2. Escoria. 3. Construção civil. I.Título

CDU 691.421


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

VITOR VEZZARO DE PAULA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

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

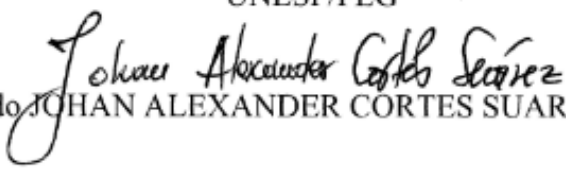

Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES

UNESP/FEG


Doutorando JOHAN ALEXANDER CORTES SUAREZ

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, pelo apoio incondicional e por me proporcionarem tamanha oportunidade, pois sem eles como base eu realmente não teria chegado e nem feito tudo o que fiz.

Também, mas não menos importantes, quero agradecer ao resto de minha família e aos meus amigos, que dividiram comigo tantas emoções ao longo destes mais de 5 anos.

Gostaria de agradecer ainda ao meu orientador Prof. Dr. Miguel Angel Ramírez Gil, pelo acompanhamento, atenção, ajuda e pela inspiração que me fez entrar nesse campo de pesquisa.

Quero agradecer aos técnicos dos laboratórios de Materiais Cerâmicos e de Engenharia CIVIL da FEG, Neto e Flávio, pela importantíssima presença ao longo das etapas experimentais.

Ao amigo Tiago Abirached, dono da empresa Uno Tijolos Eco-Modulares, pelo altruísmo em poucos encontrado. À ele desejo também todo o sucesso em sua nova empreitada.

E à minha namorada, Vanessa Corrêa Gomes, que foi incrível ao longo deste ano de tantas mudanças em minha vida.

RESUMO

É crescente a preocupação com o impacto causado por anos de exploração desenfreada do homem ao meio ambiente. O setor da construção civil, responsável pelo consumo de grande parte dos recursos naturais e também por grande parte dos descartes no meio ambiente, surge como um promissor campo de pesquisa para engenheiros, arquitetos e outros especialistas, que buscam o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e meios de produção menos agressivos. Os tijolos de solo-cimento são uma das soluções. Sua composição, seu modo de utilização e o fato de eliminar a necessidade de sinterização, fazem com que esse produto atenda aos três critérios constituintes do tripé da sustentabilidade: econômico, social e ambiental. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica da fabricação desses tijolos na indústria, substituindo o cimento em teor de 50% por escória de alto-forno. Os tijolos fabricados apresentaram acentuada fragilidade mesmo após 28 dias de sua fabricação, rompendo-se de modo relativamente fácil ainda no início do ensaio de compressão. Quanto ao ensaio de absorção de água, os valores se mostraram 9,4 p.p. acima do limite máximo de 20%, estipulado pela ABNT NBR 10833. Entretanto, esses resultados não indicam a inviabilidade do uso da escória como substituto parcial do cimento.

PALAVRAS-CHAVE: Tijolos solo-cimento. Escória de alto forno. Compressão.

ABSTRACT

There has been an ongoing concern over the impact of man's uncontrolled exploitation of the environment. The construction sector-field, responsible for the largest consumption of natural resources and also for most of the disposal tossed into the environment seems to be a promising field of research for engineers, architects and other professionals, who seek the development of more sustainable materials and less aggressive means of production. Unburned (ecological) bricks are one of the answers to this problem. Its composition, use and the elimination of the need of sintering make this product meet the three criteria that makes up the tripod of sustainability: economical, social and environmental. The objective of this paper is to evaluate the technical viability of the manufacturing of these bricks at an industrial level, replacing the cement in 50% concentration by blast furnace slag. The bricks manufactured showed high fragility even after 28 days of its manufacturing, breaking easily even at the beginning of the compression tests. As for the water absorption test, the values were 9.4 p.p. above the maximum limit of 20% as set by ABNT NBR 10833. However, these results do not indicate the unfeasibility of the use of slag as a partial replacement for cement.

KEYWORDS: Unburned (ecological) bricks. Blast furnace slag. Compression tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais com diferente granulometria.....	17
Figura 2 - Escória de alto forno moída em detalhe, após ela passar por 7 dias de moagem em moinho de esferas.	32
Figura 3 - Detalhe da prensa hidráulica utilizada.	33
Figura 4 - Exemplo do tijolo produzido com a matriz de 25 x 12,5 cm.....	34
Figura 5 - Escória diluída em água.	35
Figura 6 - Em destaque, os 6 tijolos fabricados com o traço de 90% argila, 5% escória e 5% cimento.	36
Figura 7 - Sistema desenvolvido para a cura dos	36
Figura 8 - Tijolos em estufa.....	37
Figura 9 - Detalhe das trincas longitudinais.	38
Figura 10 - Representação da serra de fita de bancada, semelhante à utilizada para cortar os corpos de prova para o ensaio de compressão.	39
Figura 11 - Detalhe dos dois tijolos separados para o ensaio de compressão.	39
Figura 12 - Etapas do ensaio de compressão e detalhe da fratura no tijolo, causada pela propagação de 4 trincas.	40
Figura 13 - Tijolos dentro da estufa antes de medida sua massa seca.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do solo segundo a Granulometria.....	13
Tabela 2 - Critérios para a seleção de solos.....	23
Tabela 3 - Composição das escórias de alto-forno no Brasil, comparativamente ao Cimento Portland Comum.....	26
Tabela 4 - Comparativo entre as propriedades da argila exigidas pela norma ABNT NBR 10833 as estimadas para a argila.	31
Tabela 5 - Volumes calculados de cada um dos componentes da mistura.	34
Tabela 6 - Massas calculadas de cada um dos componentes da mistura.	35
Tabela 7 - Massa seca e úmida dos tijolos após 28 dias, medidas para determinação da % de absorção de água.....	41
Tabela 8 - Tabela comparativa dos valores de resistência à compressão e de absorção de água entre os diferentes tipos de tijolos.	41

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	10
1.1	INTRODUÇÃO.....	10
1.2.	JUSTIFICATIVA	11
1.3	OBJETIVOS.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	SOLO.....	13
2.1.1	Argila	14
2.1.1.1	Análise granulométrica da argila.....	15
2.1.1.2	Cerâmicas vermelhas e tijolos	17
2.2	CIMENTO PORTLAND.....	18
2.2.1	Hidratação do cimento Portland.....	20
2.4	SOLO-CIMENTO	21
2.4.1	Tijolo de solo-cimento	22
2.4.1.1	Umidade de moldagem.....	24
2.4.1.2	Cura	24
2.4.1.3	Prensagem.....	24
2.5	MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	25
2.5.1	Escória de alto forno	25
2.5.1.1	O Cimento Portland com a Escória de Alto Forno.....	27
2.5.1.2	Propriedades importantes da Escória de Alto Forno	28
3	MATERIAS E MÉTODOS	30
3.1	NORMAS UTILIZADAS	30
3.2	ETAPAS DO TRABALHO	30
3.3	MATERIAIS	31
3.3.1	Argila	31
3.3.2	Escória de Alto Forno	31

3.3.3	Cimento	32
3.4	MÉTODOS.....	32
3.4.1	Preparação da mistura e fabricação dos tijolos.....	33
3.4.2	Ensaio de compressão e de absorção de água.....	36
3.4.2.1	Ensaio de compressão.....	37
3.4.3.2	Ensaio de absorção de água.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	ENSAIO DE COMPRESSÃO	38
4.2	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	40
5	CONCLUSÃO.....	42
6	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
	REFERÊNCIAS	44

1 APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A substituição parcial do cimento visa reduzir os impactos ambientais produzidos ao longo de sua cadeia produtiva, que emite uma quantidade de CO₂ equivalente a 7% da quantidade global emitida anualmente (HWANG, 2015), além de oferecer uma utilização para a escória de alto forno, rejeito da indústria metalúrgica. Do ponto de vista econômico, o uso de materiais pozolânicos implica na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento. Isto aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento. Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimentos.

A busca por novas soluções construtivas que permitam a reciclagem de resíduos, o emprego viável de ferramentas e recursos, e a eliminação de desperdícios no canteiro de obra, mas que, ao mesmo tempo supram a sempre crescente demanda habitacional, são desafios que tem se mostrado cada vez mais presentes na vida de pesquisadores, engenheiros, arquitetos e mesmo para a sociedade. Portanto, o conhecimento a respeito dos materiais pozolânicos (naturais e artificiais), no que diz respeito às suas características físicas, químicas, mineralógicas e ao seu comportamento quando adicionados a concretos e argamassas, torna-se relevante, tendo em vista os benefícios que estes materiais podem proporcionar.

Atualmente no mercado encontram-se basicamente três tipos de tijolos para a venda: os tijolos de concreto; os tijolos de cerâmica vermelha tradicionais, queimados; e um tipo mais recente de tijolo, os chamados tijolos de solo-cimento, ou tijolos não-queimados. O processo de queima dos tijolos de argila envolve um gasto muito alto de energia e a liberação de poluentes, conseqüentemente gerando prejuízos ambientais (HWANG, 2015). Tijolos não-queimados, feitos da mistura de argila com cimento Portland, possuem a vantagem de não necessitarem do processo de queima para o aumento de resistência mecânica, pois são curados à temperatura ambiente e ganham resistência nesse processo (HWANG, 2015).

Portanto, nesta pesquisa, serão fabricados tijolos de solo-cimento em tamanho real com a substituição parcial do cimento pela escória de alto forno. Para se obter dados concretos, esses tijolos foram caracterizados por ensaios de compressão e absorção de água, visando a viabilidade do processo em escala industrial.

1.2. JUSTIFICATIVA

É reconhecida a importância da construção civil no desenvolvimento humano e tecnológico, assim como é inegável o impacto causado pelas atividades desse setor no meio ambiente. Estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção. Tais aspectos ambientais, somados à qualidade de vida que o ambiente construído proporciona, sintetizam as relações entre construção e meio ambiente.

A crescente demanda humana por novas moradias, novas escolas, novos hospitais, novos centros de lazer e entretenimento, bem como polos industriais e empresariais mais modernos e funcionais não pode deixar de ser suprida. Para tanto, na busca de minimizar os impactos ambientais provocados pela construção, surge o paradigma da construção sustentável. No âmbito da Agenda 21 para a Construção Sustentável em Países em Desenvolvimento, a construção sustentável é definida como: "um processo holístico que aspira a restauração e manutenção da harmonia entre os ambientes natural e construído, e a criação de assentamentos que afirmem a dignidade humana e encorajem a equidade econômica".

Os tijolos solo-cimento, compostos basicamente por argila, são uma alternativa viável para a construção de moradias sustentáveis. A cidade de Cunha, no estado de SP, apresenta grande concentração desse material, tornando-a referência em cerâmica artística e artesanal, possuindo a maior concentração de fornos do tipo Noborigama na América do Sul, que são grandes fornos orientais a lenha.

Como parte dos esforços para o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos, de fabricação menos agressiva ao meio ambiente, o Laboratório de Materiais Cerâmicos da UNESP – Guaratinguetá, através de seus alunos, vem desenvolvendo inúmeras pesquisas. Podemos citar Ranieri (2007), que levantou informações importantes sobre as características das argilas de Cunha.

Por sua vez, Barros (2016) estudou o efeito da adição de cinza de casca de arroz para a substituição total e parcial do cimento, assim como Santos (2016), que avaliou o efeito da adição de escória de alto-forno na mistura como substituto parcial ou total do cimento.

O estudo deste trabalho utiliza de dados e informações anteriores, afim de complementá-los, sendo de grande interesse para o desenvolvimento de atividades locais, propondo o uso de rejeitos da escória de alto forno cedida pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

1.3 OBJETIVOS

Principal:

O principal objetivo deste trabalho é fabricar tijolos de solo-cimento de solo-cimento compostos por 90% de argila, 5% de cimento CP-V e 5% de escória de alto-forno e de avaliar o seu comportamento a esforços de compressão.

Específicos:

- Avaliar a viabilidade técnica da fabricação em escala industrial de tijolos de solo-cimento com adição de escória de alto-forno, mapeando os possíveis obstáculos e pontos de atenção.

- Apresentar uma alternativa para o uso da escória de alto-forno, rejeito da indústria siderúrgica, contribuindo para atenuar os impactos de seu descarte no meio ambiente.

- Caracterizar os corpos de prova do ponto de vista mecânico mediante testes de compressão e do ponto de vista físico mediante testes de absorção de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLO

O termo “solo” é empregado pela Engenharia Civil para designar, de acordo com a ABNT NBR 6502, o “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”. A classificação dos solos utilizada pela Engenharia é o tamanho das partículas que o compõem. Isto pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do solo segundo a Granulometria

FRAÇÃO	DIÂMETRO DE PARTÍCULAS (mm)
Areia	De 0,05 a 4,8
Silte	De 0,005 a 0,05
Argila	Inferior a 0,005

Fonte: Santos (1989)

Ainda que apresente boas qualidade isolantes e resistentes quando compactado, o solo está susceptível à ação de intemperismo. Como forma de torná-lo mais resistente a esses agentes, há a possibilidade de adicionar agentes estabilizantes que alteram suas características. Atualmente, existem diversas técnicas de estabilização, como por exemplo:

- Correção das características granulométricas;
- Compactação do solo; e
- Adição de componentes que irão reagir quimicamente, como o cimento.

Denomina-se estabilização dos solos certos tratamentos à que são submetidos os solos naturais, para limitar as suas variações de volume, fazendo-os mais aptos para ser usados como material de construção (ENTEICHE, 1963). Este termo se refere a qualquer processo, seja ele natural ou artificial, pelo qual o solo se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo primitivo.

Como um dos principais estabilizadores do solo, tem-se o cimento, que atua protegendo o material da ação da água. Dependendo da distribuição granulométrica, a quantidade de cimento varia para a obtenção de uma boa resistência do material. Quando o solo tem maior

conteúdo de argila maior deverá ser a quantidade do elemento estabilizante para atingir níveis adequados. Dentre os benefícios trazido pela estabilização do solo com cimento, podemos citar:

- Reduzida troca volumétrica, por absorção ou perda de umidade;
- Inalterabilidade ao submergi-lo à água;
- Resistência à compressão similar e até superior a do tijolo comum de argila cozida (PRESA, 2011).

2.1.1 Argila

Os solos de natureza argilosa apresentam características de plasticidade, ou seja, torna-se moldável quando umedecida e é capaz de manter o formato mesmo após a retirada da tensão.

A ABNT define como solos argiloso, aqueles compostos de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm. Do ponto de vista químico é formada basicamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. O óxido de ferro presente em sua composição garante a coloração avermelhada das peças, vindo daí o nome “cerâmica vermelha”. Junto com esses elementos básicos estão presentes minerais tais como sílica, alumina, mica, ferro, cálcio, magnésio, matéria orgânica e etc. Eles são a mistura de substâncias minerais resultante da desagregação do feldspato das rochas ígneas, por ação da água e gás carbônico.

Como as rochas ígneas e os feldspatos são de diversos tipos, há também diversos tipos de argilominerais. Ocorrem, então, depósitos de natureza extremamente variada. Não existem duas jazidas de argila rigorosamente iguais. Às vezes há diferenças acentuadas até numa mesma jazida. (BAUER, 1994). Dessa forma, acabou-se por entrar no aspecto geológico das argilas. Essa grande quantidade de rochas que podem originá-las nos proporciona materiais argilosos dotados de diferentes características, tais como: o Cerâmica branca (caulim residual e sedimentar); o Cerâmica refratária (caulim sedimentar e argila refratária); o Cerâmica vermelha (argila de baixa plasticidade, contendo fundentes); o Cerâmica de louça (argila plástica, com fundentes e vitrificantes). Há, ainda, outro constituinte da argila que merece considerável atenção. A montmorilonita representa um dos principais grupos dos argilominerais. Sua principal característica é a capacidade para absorver moléculas de água entre as camadas, devido a isto, argilas ricas neste argilomineral apresentam uma forte tendência a causar trincas de secagem, além de apresentar elevada plasticidade.

Na dissertação de Barros (2016) e Ranieri (2007), tem-se a composição de duas argilas, ambas coletadas em pontos diferentes da cidade de Cunha-SP, nota-se a presença de quartzo e os argilominerais são representados por gibbsita, caulinita e moscovita. Cunha é uma cidade do

interior paulista, encravada na Serra do Mar, que consolida-se dia a dia como um importante pólo de arte cerâmica do Brasil e da América do Sul, caracterizado pela diversidade técnica e estética de sua produção, o que lhe conferiu a denominação “cerâmica de autor”. A qualidade artística dos ateliês espalhados pela cidade encanta a todos, com peças inspiradas em variadas influências desde a indígena-ibérica das paneleiras à oriental - introduzida em 1975 com o forno Noborigama, caracterizado por muitas horas de queima à lenha em altas temperaturas, assim como o design contemporâneo de peças criadas por processo manual e queimadas em fornos a gás ou elétricos.

Para o material utilizado nesse trabalho, apesar de ser uma argila, decidiu-se manter o termo “solo” em algumas ocasiões devido às normas. Mas quando se fala do solo usado no trabalho, o solo argiloso, utilizamos o termo “argila”.

2.1.1.1 Análise granulométrica da argila

Na natureza os minérios possuem composições mineralógicas, granulometria e texturas diferentes dependendo da sua localização. Num mesmo depósito podem se encontrar vários tipos de minérios diferentes. Conhecendo este fato se conclui que processos tecnológicos adequados para certo tipo de minério são raramente efetivos para outra espécie similar. Dessa maneira faz-se importante o estudo mais aprofundado e detalhado sobre a espécie que se deseja explorar.

A caracterização tecnológica envolve todos os trabalhos e estudos desenvolvidos para o conhecimento das principais características de um material, avaliando a viabilidade técnica e econômica de uma possível exploração. Em caso favorável a caracterização deve fornecer o procedimento a ser utilizado na usina de processamento.

Os ensaios de caracterização devem avaliar a distribuição granulométrica do material, sua composição mineralógica, química e o grau de liberação das partículas. Atentando sempre para as técnicas de amostragem e para os erros envolvidos em cada etapa.

A partir do conhecimento detalhado do minério pode-se prever a recuperação do processo de concentração e os problemas que poderão ser enfrentados nos testes iniciais. Os resultados dos estudos devem ser suficientes para orientar a escolha de sequências de maior eficiência nos procedimentos de concentração e definir as aplicações industriais do produto obtido.

Os materiais cerâmicos sempre foram de grande importância nas civilizações antigas e nas atuais, adaptando-se as necessidades do homem e evoluindo juntamente com este. Desde a antiguidade a cerâmica tem-se modificado e moldado aos requisitos da época em curso. Com a

constante evolução dos conhecimentos e de técnicas avançadas de processamento cerâmico, foram desenvolvidas cerâmicas de alta performance, por exemplo para a indústria aeroespacial e a eletroeletrônica (cerâmicas avançadas). A cerâmica também possui um papel importante na indústria da construção civil, sendo utilizada de diversas formas na produção de telhas, tijolos, azulejos, concreto, etc (cerâmica tradicional).

A matéria prima mais importante na fabricação de cerâmica tradicional é a argila, a qual deve ser primeiramente caracterizada para sua melhor identificação e determinação do processamento mais adequado para obtenção das características finais desejadas. Em geral, as características das argilas dependem da formação geológica e da localidade de onde são extraídas. Para o emprego da argila com fins industriais, torna-se necessário identificar o tipo e as propriedades da mesma, visto que o produto obtido depende das características da matéria prima.

É de grande importância o conhecimento prévio da distribuição granulométrica das partículas do material a ser tratado, pois esta informação definirá as condições de operação e os equipamentos que levarão à granulometria desejada do produto, como também será utilizada para o cálculo da energia dispensada para produzi-lo. Ainda, servirá de base para o controle da produção de partículas finas nos processos de fragmentação, a definição do grau de liberação e da distribuição de elementos químicos e mineralógicos em cada faixa específica de tamanho e para o controle de qualidade do produto de acordo com as especificações de mercado.

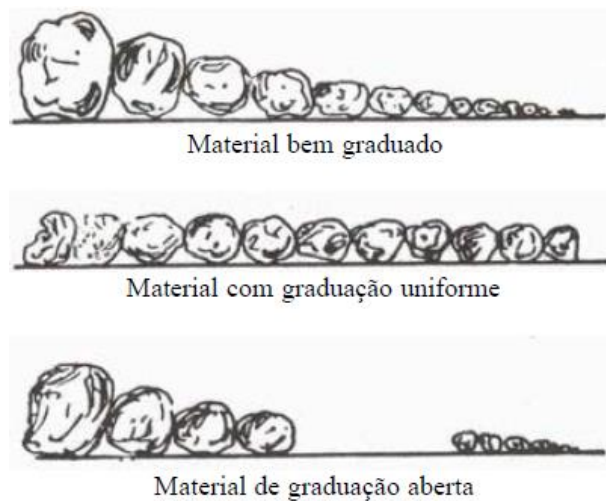
Todos os minérios, em sua fase sólida, contêm partículas de diferentes tamanhos em variadas proporções. A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência permitem obter a função distribuição de partículas do minério que é denominada distribuição granulométrica. A distribuição granulométrica dos materiais granulares (areias e pedregulhos) é obtida através do processo de peneiramento de uma amostra seca em estufa, enquanto que, para partículas mais finas como siltes e argilas se utiliza a sedimentação dos sólidos no meio líquido. Para amostras que tem partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila) se torna necessária a análise granulométrica conjunta.

A análise granulométrica por peneiramento é o método mais antigo, caracterizado por medidas diretas e utilizado em uma faixa de tamanhos de 100000 a 37 μm , e de grande aplicação em laboratórios. A superfície de peneiramento das peneiras, malha, é constituída por aberturas quadradas ou retangulares, formadas por fios trançados perpendicularmente. Todas as peneiras utilizadas constituem uma série padronizada, cujas aberturas estão relacionadas entre si por uma progressão geométrica, possibilitando a comparação dos resultados da classificação.

A colocação de pontos, representativos dos pares de valores diâmetro equivalente - porcentagem de ocorrência, em papel semilogaritmo permite traçar a curva de distribuição granulométrica.

Em função da distribuição granulométrica os materiais podem ser bem ou mal graduados. Os materiais que têm seus grãos variando, preponderantemente, dentro de pequenos intervalos, são, portanto, mal graduados. Os que têm várias frações de diâmetro diferentes misturadas; são, portanto, bem graduados.

Figura 1 - Materiais com diferente granulometria.



Fonte: Ramirez (2013)

2.1.1.2 Cerâmicas vermelhas e tijolos

A produção cerâmica é feita, em sua maioria, por empresas de pequeno e médio porte, de capital nacional. As jazidas de argila, que produzem matérias-primas com qualidade e regularidade, constituem-se em unidades mineradoras e fornecedoras à indústria de Cerâmica Vermelha ou também com unidade própria de extração.

Considerando apenas as empresas formalizadas, o parque cerâmico brasileiro é constituído por cerca de 5.500 estabelecimentos, distribuídos amplamente por todo território nacional, com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul. No entanto, outras regiões têm apresentado certo desenvolvimento dessa indústria, em especial o Nordeste, devido, principalmente, à existência de matéria-prima, energia viável e mercado consumidor em desenvolvimento (ANFACER, 2017). Segundo a ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica), o número de empresas brasileiras que trabalham com cerâmica vermelha é de aproximadamente 7400 (Ministério de Minas e Energia, 2015).

A produção de cerâmica vermelha emprega como combustíveis principalmente a madeira nativa (50%) e resíduos de madeira (40%) tais como cavaco e serragem, o que acaba gerando um excedente de biomassa para a comercialização de madeira e a necessidade de novos tipos de combustíveis (Ministério de Minas e Energia, 2015).

A localização das cerâmicas é determinada por dois fatores principais: a proximidade de jazidas (em função do volume de matéria-prima processada e da necessidade de transporte de grande volume e peso) e a proximidade dos mercados consumidores (tendo em vista os custos de transporte). Quanto maior o grau de qualidade da argila, maior é a importância assumida por esse fator locacional. Uma empresa localizada longe da jazida somente se justifica quando essa é de qualidade excepcional. Dentre as diversas substâncias minerais consumidas, destacam-se, em razão do volume de produção atingido, as argilas de queima vermelha ou argilas comuns que respondem pelo maior consumo, sendo especialmente utilizadas na cerâmica vermelha e de revestimento. Tais argilas são caracterizadas como matérias-primas de baixo valor unitário, o que não viabiliza o seu transporte a grandes distâncias, condicionando a instalação de unidades industriais cerâmicas nas proximidades das jazidas (ANFACER, 2017).

O setor de cerâmica vermelha no Brasil enfrenta grandes desafios para a manutenção e o aprimoramento do seu parque industrial, dentre eles destacam-se: necessidade de melhoria do conhecimento geológico das atuais reservas e novos estudos prospectivos para definição de outras áreas potenciais de argilas, com o objetivo de ampliar as reservas atuais e atender à demanda crescente do mercado consumidor para os próximos anos; manutenção do suprimento de argilas para o setor cerâmico compatibilizando a atividade extrativa com outras vocações econômicas do território e com a preservação ambiental, de forma a garantir para as próximas décadas o suprimento de matérias-primas para as indústrias de cerâmica vermelha; formalização da atividade extrativa, uma vez que parte dos empreendimentos opera de maneira informal ou em desacordo com a legislação mineral e ambiental; inovação na produção das matérias-primas; investimento em tecnologias para o processo de queima da cerâmica; incentivo ao associativismo, destacando-se a importância da cooperação e interação dos empreendedores em busca de soluções comuns para resolução de entraves e desenvolvimento das atividades (ANFACER, 2017).

2.2 CIMENTO PORTLAND

Os primeiros relatos sobre a história do cimento, ou *caementu* no latim, se dão há cerca de 4500 A.C., no Egito Antigo. Nessa época, utilizava-se uma liga composta por uma mistura de gesso calcinado para unir as pedras que davam sustentação à construção dos monumentos.

Em 1756, o engenheiro John Smeaton procurava um aglomerante que endurecesse mesmo com a presença de água para concluir a reforma de um farol em Edystone, Inglaterra. Porém, foi somente em meados de 1830 que o pedreiro inglês Joseph Aspdin patenteou o processo de fabricação de um ligante que resultava da mistura calcinada em proporções certas e definida, de calcário e argila, conhecida mundialmente até hoje na forma de um pó que, por apresentar cor e características semelhantes a uma pedra abundante na Ilha de Portland, na Inglaterra, foi denominado “cimento Portland”.

No Brasil, a primeira tentativa de fabricação do cimento Portland aconteceu em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho instalou em sua fazenda na cidade de Santo Antônio, interior de São Paulo, uma pequena indústria. A remodelação da cidade do Rio de Janeiro e, posteriormente, a Primeira Guerra Mundial abriram um grande mercado adicional para o produto (SNIC, 2003). O cimento começou a ser produzido no Brasil em escala industrial a partir de 1926. Na década de 70, a produção cresceu intensamente, com uma elevação do patamar de 9,8 milhões de toneladas por ano para 27,2 milhões de toneladas no início dos anos 80, período em que a recessão da economia nacional provocou queda no consumo.

A maioria dos tipos de cimento Portland hoje existente no mercado serve para o uso geral. Alguns deles, entretanto, têm certas características e propriedades que os tornam mais adequados para determinados usos, permitindo que se obtenha um concreto ou uma argamassa com a resistência e durabilidade desejadas, de forma bem econômica (ABCP, 1985). O Cimento Portland é composto de clínquer e de adições que distinguem os diversos tipos existentes, conferindo diferentes propriedades mecânicas e químicas a cada um. As adições também são ou não utilizadas em função de suas distribuições geográficas, e em geral classificadas seguindo a tabela abaixo.

Utilizado nessa pesquisa, o cimento Portland CP V-ARI não contém adições (porém pode conter até 5% em massa de material carbonático). Ele é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos demais tipos de cimento e com moagem mais fina. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial do concreto em suas primeiras idades, podendo atingir 26MPa de resistência à compressão em apenas 1 dia de idade. É recomendado o seu uso, em obras onde seja necessário a desforma rápida de peças de concreto armado. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT NBR 5733 (NASCIMENTO, 2009).

2.2.1 Hidratação do cimento Portland

Neville (1997) define o termo pega como sendo a mudança do estado fluido para um estado rígido, resultado da formação de etringitas logo após ocorrida a hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF) na presença de gesso. Endurecimento refere-se ao aumento de resistência de uma pasta de cimento após a pega.

A hidratação dos silicatos se dá algumas horas após o início da hidratação do cimento. A hidratação do C_3S e C_2S origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, compostos que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento em dissolução. Os cristais de C-S-H formados são pequenos e fibrilares e o $Ca(OH)_2$ forma grandes cristais prismáticos.

Segundo (AİTCIN, 2000), as fases dos silicatos e dos aluminatos hidratados começam a criar algumas ligações interpartículas, que resulta no endurecimento progressivo da pasta. Após algumas horas, ocorre a redução da velocidade à reação devido ao fato de algumas partículas de cimento que não reagiram estarem cobertos por uma camada de hidratos (que se torna cada vez mais espessa com o passar do tempo). O produto resultante é pouco solúvel na água não agressiva, como se confirma pela estabilidade da pasta de cimento hidratada em contato com a água.

Desta forma, pode-se verificar que o tempo de início de pega (quando se inicia o endurecimento) deve ser visto e respeitado com muito rigor. A partir deste momento, tanto as agulhas formadas na reação com os aluminatos como os cristais gerados na reação com os silicatos serão prejudicados se o concreto for manuseado após este tempo.

Outro aspecto importante é a hidratação do cimento, particularmente em concretos de altas resistências com grandes consumos. O uso de aditivos superplastificantes e relações água/cimento bem baixas fazem com que a quantidade de água do traço seja pequena. Muitas vezes, já na quantidade mínima apenas para a hidratação, uma vez que a trabalhabilidade está garantida pelo aditivo. Neste caso, o cuidado a ser tomado é que a cura seja prolongada e evite a perda rápida de água, que aqui, é justamente a água da hidratação. Desta forma, não se corre o risco de ter parte do cimento apenas como material inerte, embora o não aparecimento de fissuras esteja garantido pela alta resistência já nas primeiras idades. (AİTCIN, 2000)

2.4 SOLO-CIMENTO

De acordo com FERRARI (2014), o solo-cimento é definido como a mistura compactada de solo com cimento e água. BLÜCHER (1951) destaca que 4 fatores críticos na qualidade do solo-cimento, são eles:

- O tipo de solo;
- O teor de cimento;
- O método de mistura; e a
- Composição.

O solo é o componente em maior proporção na mistura. Além de ser o elemento de carga, sua composição define o grau de estabilidade que será atingido pelo cimento, indicando o quanto viável economicamente é a mistura (MERCADO, 1990).

Há diversas definições de solo ideal. Pinto (1980) considera como sendo ideal o solo que contém 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho. A Portland Cement Association (PCA, 1969) considera excelentes os solos arenosos e pedregulhosos, contendo de 65 a 90% de areia e quantidade de silte mais argila variando de 10 a 35%. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (1986), em geral para fins de pavimentação podem ser empregados solos com as seguintes características: partículas com diâmetro máximo de 7,5 mm; 50% das partículas passando na peneira n. 4 (4,8 mm); de 15 a 100% das partículas passando na peneira n. 40 (0,42 mm); menos de 50% das partículas passando na peneira n. 200 (0,075 mm); limite de liquidez – $LL \leq 40\%$; e índice de plasticidade – $IP \leq 18\%$. Por sua vez, a *HIGHWAY RESEARCH BOARD OF AMERICA* (1961) destaca que a porcentagem máxima da fração fina do solo deve ser de 50%. Quando o solo não possui essas características, muitos autores consideram a possibilidade de se efetuarem correções na sua granulometria, através da composição com solos mais arenosos ou mesmo a adição de areia grossa, de modo que o resultado seja favorável, técnica e economicamente (FERRAZ, 2004). Os solos mais indicados são os que predominam a fração areia em sua composição, pois necessitam de menores quantidades de cimento do que os argilosos e siltosos, entretanto, a presença da argila na composição do solo é necessária para dar a mistura coesão suficiente para permitir o manuseio dos tijolos após a prensagem.

Ceratti *et al.* (1983), Moura (1987), Silva (1991), Rocha (1996) e Parente (2002) observaram que, por meio de teste com os mais diversos tipos de solo, o aumento do teor de cimento na mistura leva ao aumento da resistência à compressão, e conseqüentemente, eleva a

durabilidade. Por outro lado, pesquisas como a de Pitta (1982) evidenciam que, para teores muito elevados de cimento, há a propensão da formação de fissuras causadas pela retração do material.

Quanto ao método de mistura, Blücher (1951) relata um menor desempenho em misturas realizadas em campo, quando comparadas àquelas feitas em laboratório, em alguns casos com desempenho até 50% inferiores nos ensaios de compressão. Felt *apud* Rocha (1996) por sua vez, concluíram que tempos de mistura muito elevados influenciam negativamente na resistência mecânica.

Blücher (1951) afirma também que a influência da relação água / cimento no solo-cimento é menor do que no concreto, e Silva (2001) comprova que a resistência à compressão é diretamente proporcional ao grau de compactação da mistura. Portanto, a umidade necessária para a hidratação do cimento pode ser suprida pela umidade ótima de compactação. Uma vez que essa umidade é alcançada, a mistura uniforme do material garante por si só que o cimento esteja em contato com umidade suficiente.

De acordo com Grande (2003), os tijolos de solo-cimento representam uma alternativa em plena sintonia com as diretrizes do desenvolvimento sustentável, 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 obra; outro aspecto é a possibilidade de racionalização do processo construtivo, por meio do uso de tijolos modulares, que possibilitam o uso das técnicas empregadas na alvenaria estrutural, proporcionando redução de desperdícios e diminuição no volume de entulho gerado; deste modo, propiciam maior rapidez no processo construtivo; economia de materiais e de mão-de-obra; eliminam os rasgos nas paredes para a passagem de tubulações, visto que os tijolos possuem furos que ficam sobrepostos no assentamento e formam dutos por onde são passados os fios e as tubulações hidráulicas; reduzem o consumo de argamassas de assentamento e de regularização (SOUZA, 2006).

2.4.1 Tijolo de solo-cimento

Presente no mercado como uma alternativa mais sustentável, os tijolos de solo-cimento têm sido amplamente estudados com as mais variadas composições. Vale destacar suas diferenças em relação aos tijolos de barro cozido, mais populares.

A estrutura formada pelas partículas minerais após a queima é responsável pela resistência mecânica (VAN VLACK, 1973). Durante a sinterização, ocorre a redução do

volume específico do material devido a coalescência de suas partículas, tendo como consequência a redução de sua porosidade.

Do outro lado a mistura íntima entre o solo com o estabilizante químico cimento Portland e a água originam esse material conhecido como solo-cimento. Segundo Enteiche (1963), citado por Mercado (1990) e Grande (2003), trata-se de um processo físico-químico de estabilização e reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias cimentantes nos contatos intergranulares, alterando, portanto, a quantidade relativa de cada uma das três fases (sólida, líquida e gasosa) que constituem o solo. No seu caso, a resistência mecânica é resultado do empacotamento das partículas após a compactação, que por sua vez garante uma maior regularidade dimensional das faces dos tijolos (ABCP, 1985)(BATTAGIN, 1988).

Carneiro (2001) ressalta outra vantagem dos tijolos de solo estabilizado: a possibilidade de incorporar outros materiais na sua fabricação, como por exemplo agregados produzidos com entulho reciclado e rejeitos industriais (sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto fornos, finos de serrarias e outros). Além disso, por não ser necessária a queima do tijolo, há uma expressiva redução do consumo de energia e, por consequência, de danos ambientais para a sua fabricação.

Regulamentado pelas NBR 10832 e NBR 10833, os solos utilizados para a fabricação de componentes de alvenaria possuem características conforme apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Critérios para a seleção de solos.

Característica	Requisitos (%)
% passando na peneira ABNT 4,8mm (n°4)	100
% passando na peneira ABNT 0,075 (n° 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Fonte: Adaptado da NBR 10832 (1989) e NBR 10833 (1989)

O processo de fabricação do tijolo de solo-cimento prensado corresponde às seguintes etapas:

- Preparação do solo: que consiste em destorroar e peneirar o solo seco;
- Preparo da mistura: adiciona-se o cimento ao solo preparado e realiza-se uma mistura com os materiais secos. Após a homogeneização adiciona-se água e mistura-se novamente o material até uniformizar a umidade no solo;
- Moldagem dos tijolos;

- Cura e armazenamento: após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens.

2.4.1.1 Umidade de moldagem

Para atingir uma boa densidade de compactação, é imprescindível que a mistura do solo com o cimento esteja na umidade ideal. A partir deste ponto o acréscimo de mais água prejudica a eficiência da compactação, visto que as próprias moléculas de água recebem a carga de pressão e impede o maior nível de resistência dos tijolos.

A umidade ótima varia de solo para solo dependendo de sua composição e da forma como as partículas se agrupam (RIGASSI, 1985).

2.4.1.2 Cura

Os tijolos de terra quando estabilizados também precisam manter a umidade presente para evitar a saída rápida da água da mistura. Se ocorrer a evaporação, não vai haver tempo para ela reagir com todas as partículas de cimento e a qualidade do tijolo diminui, perdendo resistência. Um método muito eficaz consiste em se cobrir os tijolos com uma lona plástica tão logo eles sejam fabricados. Assim impede-se a evaporação da água e garante a cura dos tijolos.

Conhecendo os diversos tipos de cura utilizados para a confecção de tijolos de solo-cimento, o CEPED (1984) realizou alguns ensaios, relacionando a resistência à compressão simples em corpos-de-prova submetidos a algumas condições de cura. Tais estudos comprovaram ainda haver uma redução na resistência da ordem de 40% quando não se usa qualquer processo que evite uma secagem rápida. Esta secagem rápida ocasiona a formação de trincas e, no caso da não ocorrência de um processo sistemático de molhagem, pode ocorrer ainda um “esfarelamento” superficial, tornando a peça de solo-cimento, vulnerável a qualquer ação mais rigorosa de chuvas e ventos. Se a rigidez da mistura for muito elevada e se as condições de cura forem inadequadas ocorre a formação de trincas transversais de retração na camada cimentada.

2.4.1.3 Prensagem

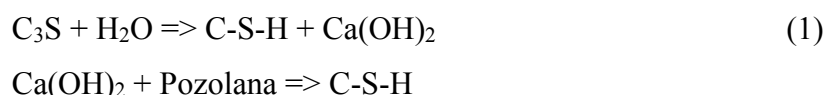
A Compactação de solo é definida como o método de aumentar mecanicamente a densidade do solo através da união das partículas solo e do estabilizante em questão. Em construção, esta é uma parte importante do processo de edificação.

O tipo de prensa é importante, pois, quanto maior a compactação imposta ao solo, melhor será o desempenho final do tijolo. No mercado encontram-se diversos tipos de prensas, manuais

e hidráulicas. Estas últimas imprimem ao solo pressões muito maiores do que as manuais, resultando em produtos muito resistentes (BARBOSA, 2003).

2.5 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros (ABCP, 2002). Também há possibilidade de se produzir pozolana artificial queimando-se argilas ricas em alumínio a temperaturas próximas de 700°C. A adição de pozolana propicia ao cimento maior resistência a meios agressivos como esgotos, água do mar, solos sulfurosos e a agregados reativos. Diminui também o calor de hidratação, permeabilidade, segregação de agregados e proporciona maior trabalhabilidade e estabilidade de volume, tornando o cimento pozolânico adequado a aplicações que exijam baixo calor de hidratação, como concretagens de grandes volumes. (FILHO, 2011). A seguir a reação pozolana (1):



2.5.1 Escória de alto forno

A escória de alto forno é um resíduo da produção de ferro gusa em alto forno. Em siderúrgicas que operam altos fornos a carvão de coque são geradas aproximadamente 300 toneladas de escória por tonelada de ferro gusa. Altos fornos que utilizam como combustível carvão vegetal a geração de escória é inferior a este valor (JOHN, 1995). A Tabela 3 apresenta as composições químicas típicas das escórias produzidas pelos diferentes processos, e através dela pode-se notar as semelhanças existentes em sua composição, quando comparada com o cimento Portland.

Tabela 3 - Composição das escórias de alto-forno no Brasil, comparativamente ao Cimento Portland Comum.

	Escória básica	Escória ácida	Cimento Portland
CaO	40-45	24-39	66
SiO ₂	30-35	38-55	22
Al ₂ O ₃	11-18	8-19	5
MgO	2,5-9	1,5-9	-
Fe ₂ O ₃	0-2	0,4-2,5	3
FeO	0-2	0,2-1,5	-
S	0,5-1,5	0,03-0,2	-
CaO/SiO ₂ média	1,31	0,68	3

Fonte: John (1995)

Dentre os produtos pozolânicos conhecidos, a escória de alto forno caracteriza-se por sua aplicação em composição do cimento Portland e na constituição do concreto para mitigação da reação álcali-agregado. A escória granulada de alto-forno é um subproduto gerado na fabricação do gusa em alto-forno, onde a fusão da ganga (minério de ferro + impurezas) e dos fundentes (coque ou carvão vegetal) geram por meio de reações químicas a escória. Durante o processo de produção em alto forno, o produto gerado é uma mistura heterogênea de ferro gusa e a escória em alta temperatura, sendo separadas em função das diferenças de densidade.

A produção anual de escórias de alto forno no Brasil em 1996 foi de 6,4 milhões de toneladas, sendo que 0,7 milhões na resfriadas lentamente e o restante granulado, sendo, portanto, adequado a reciclagem como aglomerantes. Nem toda a escória granulada, mesmo a de composição básica, é consumida pela indústria cimenteira, permanecendo acumulada em aterros, fato esse uma das motivações para essa pesquisa. A fração de escória resfriada lentamente é utilizada internacionalmente como agregado para concreto, base para pavimentação, mas seu uso não é ainda difundido no Brasil, onde a fração granulada acumula-se nas usinas. No mercado norte-americano 85% dos 11,8 Mton de escória de alto forno produzidas anualmente é resfriada lentamente e comercializada como agregado.

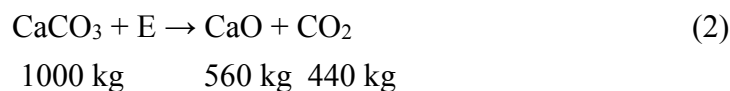
Dentre os destinos dados pela indústria siderúrgica para a escória gerada, o mais relevante é a integração desse material na cadeia produtiva do cimento Portland, pois substituição parcial do clínquer na produção do cimento por materiais recicláveis, como no caso das escórias, corresponde a vantagens econômicas, energéticas, e ainda reduz o impacto ambiental negativo na fabricação do cimento, com a diminuição na formação de gases, especialmente o gás carbônico; economia de energia devido à redução do calor de formação do clínquer;

preservação de recursos naturais, qualificando-se como uma prática sustentável (MURPHY et al, 1997 e SHI e QIAN, 2000).

Uma outra forma de utilização da escória granulada de alto forno consiste no uso de suas propriedades cimentícias, em estruturas de concreto. Essas propriedades são associadas à reatividade da escória de alto forno em sua forma vítrea. Todavia, deve-se ressaltar que essa condição apenas não é suficiente para o seu emprego como aglomerante, pois é necessário que a escória seja solúvel, isto é, passível de ataque pela água, para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Essa solubilidade é elevada em função do teor de óxido de cálcio e óxido de magnésio constituintes da escória, e a presença de íons cloreto e/ou sulfato na água, sendo a velocidade de reação favorecida pela finura da escória. A ciência do concreto é relativamente recente e é esperado que nos próximos anos, o seu desenvolvimento deverá implicar na produção de novos tipos de concretos que melhor satisfaçam diferentes necessidades socioeconômicas (AÏTCIN, 2000). A escória de alto forno a carvão vegetal tem teores significativos de óxido de cálcio (26 a 35%) logo é facilmente atacada pela água levando à formação dos compostos hidráulicos, sugerindo a possibilidade de sua utilização em estruturas de concreto de forma análoga à escória de alto forno com coque mineral.

2.5.1.1 O Cimento Portland com a Escória de Alto Forno

A reciclagem da escória de alto forno na produção de cimento é uma aplicação que teve início no Brasil no início da década de 50 (JOHN, 1995). Ela apresenta várias vantagens. Em primeiro lugar, permite uma redução da poluição emitida na produção do clínquer. A produção do clínquer implica na calcinação de calcário, que libera grande quantidade de CO₂, responsável pelo efeito estufa conforme a reação (2) abaixo:



Além da redução da quantidade CO₂ pela descarbonatação, é também reduzida a quantidade de combustível, uma vez que a escória não precisa ser calcinada. A calcinação é um processo de decomposição química sendo vigorosamente endotérmico (representado pela letra E na fórmula acima). Esta redução de poluentes devido a economia de combustível varia com o teor de adição, tendo sido estimada por Tu *et al.* (1997) entre 274 e 321 kg de CO₂ por tonelada de clínquer, além da redução de outros poluentes, como o SO_x. Para estes autores, nas condições da indústria de cimento brasileira, a substituição de 60% do clínquer por escória de

alto forno permite uma redução de CO₂ de 494 kg/ton cimento. Evidentemente a redução poderá ser menor caso o resíduo tenha sido transportado por longas distâncias por via rodoviária. Um aspecto raramente considerado é que a parte deste CO₂ é reabsorvido na forma de carbonatação do concreto.

A produção de cimentos Portland contendo escória apresenta também significativos benefícios de engenharia: (a) redução do calor de hidratação, importante em grandes peças de concreto, como barragens; (b) controle da reação de álcali-agregado, que leva a destruição de estruturas expostas à umidade; (c) melhoria da resistência contra a penetração de cloretos.

2.5.1.2 Propriedades importantes da Escória de Alto Forno

A Escória de Alto Forno contém pouco óxido de cálcio, CaO, e, por isso, é pouco reativa e precisa ser misturada ao clínquer do cimento Portland, para reagir com o Ca(OH)₂ que é formado pela dissolução, na água, do CaO do cimento Portland. Formam-se os mesmos C-S-H e C-H, que se formam na hidratação do clínquer do cimento Portland. Para aumentar a reatividade da escória de alto forno, ela é moída com partículas muito finas, para ter uma maior superfície em contato com a água.

Estudos anteriores apontam que a escória finamente moída apresenta boas propriedades pozolanas. Sua estrutura amorfa, resultante do processo de fabricação resultante do resfriamento brusco, e a composição química adequada permitem uma aplicação mais nobre desse resíduo, como substituto do cimento. A possibilidade da utilização de escórias como material de propriedades pozolânicas e cimentícias dependem fundamentalmente de sua composição química (escórias ácidas ou básicas), de suas características reativas (dependendo do tipo do resfriamento) e de características ambientais (classificação do tipo do resíduo) (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Experiências com escórias de alto forno tem mostrado que uma maior proporção vítrea (estrutura amorfa) contribui decisivamente na reatividade dos resíduos uma vez incorporados ao cimento, com uma adequada composição química. As escórias granuladas de alto forno, que apresentam estrutura amorfa, são compostas essencialmente por óxidos de silício e cálcio. A composição química e a estrutura física das escórias de alto-forno podem variar de acordo com a eficiência de operação do forno, do teor de minérios utilizados e do método de resfriamento. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Nas escórias de alto forno são encontrados cristais de silicatos duplos de cálcio e alumínio (gehlenita) e de cálcio e de magnésio que se apresentam como monticelita, ackermanita ou merwinita, além dos silicatos monocálcicos e dicálcicos (SILVA, 2000). O composto óxidos de cálcio e óxidos de magnésio, ocupam mais de 60% de seu peso, além do óxido de cálcio ser

indispensável para a basicidade do processo, enquanto que o principal papel do óxido de magnésio ser proteção das paredes refratárias dos fornos durante o processo de obtenção das escórias. Os óxidos de silício e alumínio juntos a outros óxidos constituem outros 40% do peso total das escórias (TANIGUCHI, 2009). Como nem todas as produções de aço são iguais, portanto devem ser analisadas pontualmente as composições químicas em cada caso.

A adição de escória de alto forno confere uma série de características ao cimento Portland, tais como o controle da velocidade e a menor liberação de calor na hidratação, fazendo com que o cimento de alto forno seja adequado para obras de concreto e argamassa em ambientes marinhos e em concretagem de grandes volumes. As escórias líquidas são normalmente condutoras elétricas, enquanto vários de seus constituintes não conduzem eletricidade no estado sólido. Assim, é razoável supor que as escórias líquidas contenham íons positivos (cátions), tais como Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{2+} e íons negativos (ânions) como O^{2-} , Po_4^{5-} e SiO_4^{4-} . Escórias ricas em Sílica apresentam maior viscosidade (SILVA, 1998). Segundo Battagin e Esper (1988), as escórias brasileiras de natureza básicas utilizadas na indústria cimenteira apresentam em média de 40% a 45% de CaO, 30% a 36% de SiO_2 , 12% a 17% de Al_2O_3 e 2% a 8% de MgO. Uma classificação útil para os óxidos, dentro do modelo iônico de escórias é distingui-los entre doadores ou receptores de íons O^{2-} . Os óxidos doadores são classificados como básicos, e os receptores ácidos (SILVA, 1998).

Do ponto de vista químico, quando a escória entra em contato com a água começa a dissolver-se, mas uma película superficial é formada rapidamente sobre as partículas. Esta película é deficiente em Ca^{2+} e inibe o avanço da reação de hidratação; para que a reação continue, é necessário que o pH seja mantido em valor alto (PEREIRA, 2010). A basicidade está diretamente ligada à sua composição química. Escórias mais básicas apresentam então, resistências mecânicas melhores (SILVA, 1998).

Segundo Moreira (2006), no estudo do aproveitamento da escória de alto forno para fabricação de material cerâmico, chegou-se à conclusão que é possível a fabricação de telhas, tijolos de alvenaria e tijolos furados, a partir da mistura argila-escória. O uso controlado de escória misturado à argila para fabricação de produtos cerâmicos é tecnicamente viável, demonstrando também viabilidade para ser uma alternativa eficiente na diminuição de problemas de poluição.

Após a revisão bibliográfica foi possível obter informações sobre os materiais utilizados no trabalho que sinalizam o seu uso de forma promissora para a fabricação de tijolos. Apesar disso, não foram encontrados na literatura trabalhos específicos sobre os materiais em questão (escória de alto forno obtida da CSN e argila da cidade de Cunha) para a fabricação do material

proposto. Tampouco foram encontrados trabalhos realizados com as composições em questão. Sendo assim, o presente trabalho tem não só um caráter ambiental focado em sustentabilidade, mas também um caráter inovador sobre esse tipo de material, dada a baixa quantidade de estudos nesse sentido e a falta de normas específicas sobre materiais sustentáveis para a fabricação de tijolos.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo são mostrados os métodos utilizados para a determinação do traço utilizado, dos equipamentos também utilizados, dos métodos de ensaio e da programação seguida. A metodologia de trabalho consistiu na caracterização dos materiais em estudo e determinação dos parâmetros de resistência e absorção dos produtos resultantes.

3.1 NORMAS UTILIZADAS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta normas para a fabricação de tijolos de solo-cimento, que são:

- NBR 8491 - Tijolo maciço de solo-cimento - Especificação
- NBR 8492 - Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio
- NBR 10832 - Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Procedimento
- NBR 10833 - Fabricação de tijolo maciço e tijolo vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica. Procedimento
- NBR 10834 - Tijolo vazado de solo-cimento sem função estrutural. Especificação
- NBR 10834 - Tijolo vazado de solo cimento sem função estrutural.
- NBR 10835 - Tijolo vazado de solo cimento sem função estrutural - Forma e dimensões.
- NBR 10836 - Tijolo vazado de solo-cimento sem função estrutural - Determinação da resistência à compressão e da absorção de água.

3.2 ETAPAS DO TRABALHO

As etapas do presente trabalho se encontram resumidas abaixo:

1. Estudo bibliográfico;
2. Cálculo da quantidade de material a ser utilizado;
3. Preparação das matérias-primas;
 - a. Moagem da escória de alto-forno.

- b. Pesagem do cimento, da argila e da escória já moída.
4. Acoplagem da matriz 25 x 12,5 cm na prensa hidráulica.
5. Fabricação dos tijolos;
 - a. Mistura dos componentes
 - b. Prensagem da massa
 - c. Remoção dos tijolos da prensa
6. Cura
7. Preparação dos tijolos
8. Ensaios

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Argila

A argila foi escolhida em pontos específicos, de acordo com o interesse e conhecimento prévio dos ceramistas envolvidos da cidade de Cunha - SP, e o estudo da potencialidade para diversas aplicações tecnológicas.

Buscou-se uma homogeneidade da amostra e a ausência de impurezas observadas a olho nu, tais como folhas e galhos. A argila utilizada é constituída principalmente por quartzo, muscovita e caulinita (RANIERI, 2007). Sua análise granulométrica a classifica como sendo um solo argiloso, pertencente ao grupo de argilas A6 (Santos, 2016). Outras informações quanto as propriedades da argila utilizada estão na tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo entre as propriedades da argila exigidas pela norma ABNT NBR 10833 as estimadas para a argila.

Propriedade	NBR 10833	Valor estimado
Limite de liquidez (LL)	≤ 45%	29%
Limite de plasticidade (LP)	≤ 18%	20%
Quant. de material que passa pela peneira de abertura 4,75 mm	100%	100%
Quant. de material que passa pela peneira de abertura 0,75 µm	10% - 50%	73,97%

Fonte: Santos (2016)

3.3.2 Escória de Alto Forno

A escória de alto forno foi doada pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), a maior indústria siderúrgica do Brasil e da América Latina, e uma das maiores do mundo. Sua usina situa-se na cidade de Volta Redonda, no médio Paraíba, no sul do estado do Rio de Janeiro, tendo suas minas de minério de ferro e outros minerais na região de Congonhas e Arcos, ambas

cidades do estado de Minas Gerais e também de carvão na região de Siderópolis no estado de Santa Catarina. Sua principal usina hoje produz cerca de 6 milhões de toneladas de aço bruto e mais de 5 milhões de toneladas de laminados por ano, sendo considerada uma das mais produtivas do mundo (CSN, 2017).

A escória de alto forno passou pelo moinho de esferas, por 1 semana, de maneira intermitente. Então, as partículas foram passadas por uma peneira de malha 200 Abertura: 0,075 mm para classificar as partículas. Como visto na revisão bibliográfica, com partículas bem finas, não é necessário a utilização de um ativante (como por exemplo, a cal). Assim como devido a composição da escória possuir uma grande quantidade de CaO e pouca SiO₂. Na figura 2, tem-se a escória de alto forno após todo o processo.

Figura 2 - Escória de alto forno moída em detalhe, após ela passar por 7 dias de moagem em moinho de esferas.



Fonte: Produção do próprio autor

3.3.3 Cimento

O cimento utilizado foi adquirido em uma loja de materiais de construção, cimento do tipo CP-V ARI. A escolha desse tipo de cimento deve-se ao fato de ser um cimento praticamente sem adições minerais, apresentando no máximo 5% de calcário e sendo o restante do material composto, majoritariamente, por silicato tricálcico (C₃S) e silicato dicálcico (C₂S). Sendo assim, anula-se a interferência de outros agentes no processo de ganho de resistência mecânica do material. Por esse fato, esse tipo cimento também reage mais rápido que os demais, permitindo uma análise rápida das características do material.

3.4 MÉTODOS

A metodologia adotada é composta por basicamente 3 etapas: preparação dos componentes; fabricação dos corpos de prova; e ensaios de compressão e de absorção de água.

Os processos de caracterização das matérias-primas não foram realizados, uma vez que as informações acerca delas se encontram disponíveis na literatura através da pesquisa de

Santos (2016), que utilizou dos mesmos componentes na fabricação de pequenos corpos de prova utilizados no ensaio para ensaio de flexão.

3.4.1 Preparação da mistura e fabricação dos tijolos

Os tijolos foram fabricados em parceria com a empresa Uno Tijolos Eco-Modulares, localizada na cidade de Pindamonhangaba – SP, utilizando a prensa hidráulica EcoPremium Double, com capacidade de prensagem de 12 toneladas.

Figura 3 - Detalhe da prensa hidráulica utilizada.



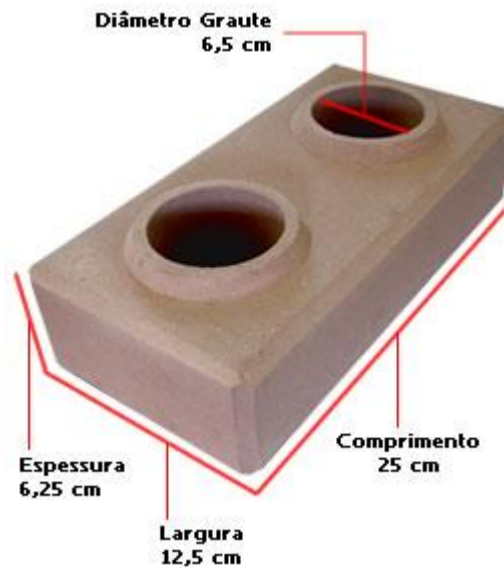
Fonte: Produção do próprio autor

Os tijolos foram fabricados conforme as dimensões especificadas pela ABNT NBR 10835. De acordo com essa norma, os tijolos com furos circulares são classificados como blocos especiais, e suas especificações devem ser objeto de acordo entre as partes (item 4.1.2). A norma exige somente que as paredes do bloco respeitem a espessura mínima de 25 mm.

Inicialmente foram preparadas 6 frações de argila, cimento e escória para a fabricação dos 6 tijolos, conforme exigido pela norma ABNT NBR 10836, sendo o lote dividido em 3 tijolos para o ensaio de compressão e 3 tijolos para o ensaio de absorção de água. Foram utilizados, em volume, 90% de argila, 5% escória e mais 5% de cimento. De acordo com Santos (2016), esse traço apresentou melhores respostas aos esforços de flexão no ensaio à 3 pontos.

A matriz utilizada é capaz de fabricar tijolos com volume aparente igual a $2187,5 \text{ cm}^3$ ($25 \times 12,5 \times 7 \text{ cm}$), conforme é ilustrado na figura 4. Eles são vazados por dois furos, que somam um volume vazio total de $197,9 \text{ cm}^3$, resultando num tijolo com volume efetivo de $1791,7 \text{ cm}^3$.

Figura 4 - Exemplo do tijolo produzido com a matriz de $25 \times 12,5 \text{ cm}$.



Fonte: Tijoloecologicoautentico (2010)

Sendo assim, os $1791,7 \text{ cm}^3$ do volume efetivo do tijolo foram divididos conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5 - Volumes calculados de cada um dos componentes da mistura.

Volume efetivo unitário do tijolo (cm^3)	Volume de argila (cm^3)	Volume de escória (cm^3)	Volume de cimento (cm^3)	Volume de água (cm^3)
1791,7	1612,5	89,6	89,6	179,2

Fonte: Produção do próprio autor

Santos (2016) determinou, por meio de pictometria líquida, a densidade dos três componentes:

- Densidade argila: $2,43 \text{ g/cm}^3$;
- Densidade escória de alto forno: $2,66 \text{ g/cm}^3$;
- Densidade cimento: $2,90 \text{ g/cm}^3$.

Portanto, calculou-se que, para fabricar uma unidade do tijolo, foram necessários 3918,4 g de argila, 259,8 g de cimento e 238,3 g de escória, sendo a massa final média igual a 4416,5 g. Tais valores se encontram resumidos na tabela 6.

Tabela 6 - Massas calculadas de cada um dos componentes da mistura.

Massa unitária do tijolo (g)	Massa de argila (g)	Massa de escória (g)	Massa de cimento (g)
4416,54	3918,4	259,8	238,3

Fonte: Produção do próprio autor

Após ser pesada, a escória foi diluída em água, e a solução deixada em repouso por aproximadamente 30 minutos, tempo necessário para garantir a formação de C-S-H, conforme ilustrado pela figura 5.

Figura 5 - Escória diluída em água.



Fonte: Produção do próprio autor

Na sequência, misturou-se a solução à argila e ao cimento, utilizando uma betoneira. Terminada a mistura, a massa foi transportada por uma esteira até o topo da prensa para alimentar o dispositivo de preenchimento do molde com o material. A seguir a carga de duas toneladas foi aplicada e o tijolo conformado. Os tijolos fabricados eram imediatamente removidos do equipamento segurando-os pelas laterais, e então levados para fora do galpão onde seriam curados por um sistema de irrigação, conforme é visto na figura 6.

Figura 6 - Em destaque, os 6 tijolos fabricados com o traço de 90% argila, 5% escória e 5% cimento.



Fonte: Produção do próprio autor

No processo de cura os tijolos foram molhados durante os 7 primeiros dias. Nesse tempo eles foram mantidos cobertos para evitar danos causados por agentes externos (figura 7). A molhagem foi feita por um sistema de mangueiras com pequenos furos e coberta dia e noite por uma lona, de forma a impedir a evaporação da água (PRESA, 2011).

Figura 7 - Sistema desenvolvido para a cura dos tijolos produzidos pela fábrica.



Fonte: Produção do próprio autor

Após 28 dias, os tijolos foram levados ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, onde permaneceram até que se completassem os 28 dias de envelhecimento pré-estabelecido, para então que fossem realizados os ensaios de compressão e de absorção de água.

3.4.2 Ensaios de compressão e de absorção de água

Ambos os ensaios são regulamentados pela ABNT NBR 10836.

3.4.2.1 Ensaio de compressão

A norma exige que sejam utilizados no mínimo 3 tijolos. Eles devem ser capeados utilizando pasta de cimento Portland de consistência plástica como forma de garantir uma superfície plana e lisa. Após o endurecimento dessa pasta, os tijolos devem ser imersos em água por 24h antes de serem levados para o ensaio. Já na prensa, eles devem ser posicionados de forma que a força aja de forma perpendicular aos furos, e a carga, aplicada até que is

3.4.3.2 Ensaio de absorção de água

A norma exige que os 3 corpos de prova sejam colocados em estufa a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C, conforme figura 8, onde devem permanecer por no mínimo 24h. Retirados da estufa, os tijolos devem ser pesados e, em seguida, imersos em água, onde tem que permanecer por mais 24h. Passadas mais 24h, eles devem ser retirados da água e novamente pesados.

Figura 8 - Tijolos em estufa.



Fonte: Produção do próprio autor

O valor da absorção, expresso em porcentagem, para cada corpo-de-prova deve ser calculado pela equação 2, onde M_2 é igual a massa saturada, e M_1 a massa seca.

$$A\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo dos 28 dias de envelhecimento, foi possível observar a formação gradual de trincas longitudinais nos tijolos, conforme mostrado na Figura 9. Como consequência, os tijolos

se mostraram frágeis e sensíveis ao toque, sendo que dois deles se romperam simplesmente ao serem movidos, restando somente 4, dos 6 fabricados.

Figura 9 - Detalhe das trincas longitudinais.



Fonte: Produção do próprio autor

De acordo com Blücher (1951), a mistura realizada em campo, quando comparadas àquelas feitas em laboratório, apresentam casos de desempenho mecânico até 50% inferiores em ensaios de compressão, dependendo da eficiência dos equipamentos e do ambiente onde a mistura é realizada.

Outro fator é a distribuição granulométrica do solo, que influencia na qualidade e na resistência final do solo-cimento. De acordo com Santos (2016), a argila utilizada apresenta em sua distribuição granulométrica, 73,97% de partículas passando pela peneira de 0,075mm, número 23,97 p.p. acima do limite máximo recomendado pela ABNT NBR 10833, evidenciando um material muito fino e, conseqüentemente, não ideal para a fabricação de tijolos. Autores como Pinto (1980) e Sagatiba (2000) já apontavam a importância de um solo bem graduado, ou seja, uma mistura de silte, argila, areias fina e grossa, e até mesmo pedregulhos.

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O manuseio dos tijolos de solo-cimento já evidenciava sua fragilidade. Dos 4 tijolos restantes, dois foram separados para o ensaio de compressão.

A ABNT NBR 10836 determina que antes do ensaio de compressão os tijolos sejam divididos ao meio e que suas metades sejam sobrepostas e unidas por uma fina camada de argamassa, através da superfície de maior área.

A etapa de corte dos tijolos se mostrou bastante sensível. Para realizá-la, foi utilizada uma serra de fita de bancada, semelhante à da figura 10, pelo fato dela fornecer uma base estável para o corte.

Figura 10 - Representação da serra de fita de bancada, semelhante à utilizada para cortar os corpos de prova para o ensaio de compressão.



Fonte: Produção do próprio autor.

Entretanto, ao primeiro contato com a fita, o primeiro dos tijolos se rompeu, inutilizando-o totalmente para o ensaio. Por outro lado, o mesmo não ocorreu ao segundo tijolo, que pôde ser ensaiado conforme observa-se na figura 11.

Figura 11 - Detalhe dos dois tijolos separados para o ensaio de compressão.



Fonte: Produção do próprio autor

Ambas as metades do segundo tijolo foram unidas pela camada de argamassa 24h antes do ensaio, conforme estipulado pela norma. Porém, no dia seguinte, ele se rompeu logo após colocado na prensa para o ensaio de compressão, ao simples contato do embolo do equipamento, sem haver qualquer carga considerável agindo sobre ele. Esse comportamento, ilustrado na figura 12, evidenciou ainda mais a fragilidade dos tijolos fabricados.

Figura 12 - Etapas do ensaio de compressão e detalhe da fratura no tijolo, causada pela propagação de 4 trincas.



Fonte: Produção do próprio autor

4.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Também regulamentado pela ABNT NBR 10836, o ensaio de absorção ocorreu sem problemas. Os dois tijolos separados para este ensaio foram secos à 105 °C. A figura 13 ilustra os tijolos em estufa, onde permaneceram por 24h.

Figura 13 - Tijolos dentro da estufa antes de medida sua massa seca.



Fonte: Produção do próprio autor

Encerrado o período em estufa, os tijolos foram retirados, pesados, e imediatamente imersos em água destilada, onde permaneceram por mais 24h para então, serem novamente pesados afim de que fossem obtidas suas massas úmidas. As massas encontradas estão apresentadas, juntamente com a % de absorção de água de cada tijolo, na tabela 7.

Tabela 7 - Massa seca e úmida dos tijolos após 28 dias, medidas para determinação da % de absorção de água.

	Tijolo 1	Tijolo 2	Média	Desvio
Massa seca (g)	2593,7	2429,9	2511,8	115,8
Massa úmida (g)	3316,9	3183,6	3250,3	94,3
% de absorção de água	27,9	31,0	29,4	

Fonte: Produção do próprio autor

Assim como no ensaio de compressão, os tijolos fabricados tiveram resultados insatisfatórios. Na tabela 8 é feito um breve comparativo das propriedades medidas nesse experimento com os valores médios encontrados no mercado para os tijolos de cerâmica queimada tradicional e para os tijolos de concreto, além do que ABNT NBR 8491 recomenda.

Tabela 8 - Tabela comparativa dos valores de resistência à compressão e de absorção de água entre os diferentes tipos de tijolos.

	Resistência à compressão (MPa)	Abs. de água (%)
Tijolos de cerâmica queimada	8,1	13,2
Tijolos de concreto	3,5	9,8
ABNT NBR 8491	$\geq 2,0$	≤ 20
Tijolo de solo-cimento com a composição avaliada	N/D	29,4

Fonte: Produção do próprio autor

Observa-se que os tijolos fabricados com a substituição parcial do cimento por escória de alto forno moída, apresentaram valores de absorção de água 9,4 p.p. acima do que foi estipulado pela norma, e valores até 3x maiores dos encontrados nos demais tipos de tijolo disponíveis no mercado.

5 CONCLUSÃO

Após a realização desse trabalho, que envolveu o estudo bibliográfico do tema, a preparação dos componentes da mistura, as etapas de fabricação e cura, até os ensaios planejados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

Os resultados obtidos não indicam inviabilidade em utilizar a escória de alto-forno como substituinte parcial do cimento na fabricação dos tijolos de solo-cimento. Entretanto, deve-se estar atento durante a preparação desse componente, uma vez que, para que atinja a reatividade necessária, a escória deve ser devidamente moída até que se obtenham partículas de dimensões próximas a do cimento.

A moagem da escória, por sua vez, se mostrou um dos gargalos do processo nessa pesquisa. Seu processamento se tornou lento devido a utilização do moinho de esferas, método de baixa energia. Porém, seu uso foi preterido ao do moinho vibratório devido a sua maior capacidade volumétrica. A utilização do equipamento demandou 7 dias de trabalho ininterruptos até que a granulometria necessária fosse alcançada. Por outro lado, vale lembrar que esse procedimento foi realizado em laboratório e, uma vez que nas indústrias, uma maior gama de moinhos de volume e energia superiores poderiam ser empregados mais facilmente.

A escória de alto forno possui grande potencial para essa aplicação, sendo necessária somente a correção granulométrica da argila utilizada, porém, o surgimento de novas variáveis e obstáculos quando a pesquisa migra do laboratório para o campo demanda pontos de atenção.

A distribuição granulométrica do solo utilizado, composto basicamente por partículas finas, apresentou grande influência no resultado encontrado. Autores como Pinto (1980) e Sagatiba (2000) apontam a importância de um solo bem graduado, ou seja, uma mistura de silte, argila, areias fina e grossa, e até mesmo pedregulhos, na fabricação de tijolos com boa resistência mecânica.

Portanto, conclui-se que a utilização de escória de alto-forno como substituinte do cimento na fabricação de tijolos de solo-cimento não está descartada, uma vez que as evidências apontam para o uso de um solo mal graduado, como sendo o responsável pela alta fragilidade das peças produzidas. Tal fato abre uma brecha para a adição de novos componentes nessa mistura, como a areia, afim de garantir propriedades mecânicas mais elevadas e, conseqüentemente, reduzir ainda mais os custos inerentes a produção.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com as experiências obtidas ao longo desse trabalho, deixo a seguir minhas ideias para trabalhos futuros:

1. Avaliar a possibilidade de adicionar solos mais arenosos ou mesmo a adição de areia grossa à mistura, como forma de corrigir a granulometria predominantemente fina da argila e com isso garantir melhores desempenhos mecânicos, e, quiçá, menores custos de produção;
2. Realizar ensaios de retração afim de detectar possíveis características expansivas da argila de Cunha-SP;
3. Propor métodos mais eficientes de moagem da escória como forma de reduzir o gargalo gerado por essa etapa;
4. Realizar o estudo da escória de alto forno com a adição de cal, para certificar se ocorrerá ganhos na resistência no material.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP, Boletim Técnico BT-111, 1985, 5p.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. e. São Paulo, 2002. 28p.

AÏTCIN, P-C. **Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow**. Cement and Concrete Research, Canadá, v. 30, n. 9, p. 1349-1359, 2000.

ANFECER. **Revestimentos Cerâmicos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br>>. Acesso em: 19 de set. 2017.

BARBOSA, N. P.: **Transferência e aperfeiçoamento da tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua em comunidades carentes**. Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional, Porto Alegre, v. 2, p. 12-39, 2003.

BARROS, F. S. **Efeito da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz e cal nas propriedades de tijolos de solo-cimento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

BATTAGIN, A. F.; ESPER, M. W. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno**. São Paulo, ABCP, s. nt, 1988.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994, v.2. 544 p.

BLÜCHER, E. **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários**. São Paulo: Blücher, 1951. 191 p.

CARNEIRO, R. **Direito Ambiental: Uma abordagem Econômica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2001. 816 p.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO - CEPED. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari: CEPED/ABCP, 1984. 116 p.

CERATTI, J. A. P.; MEDINA, J. **Estudo de solos estabilizados com cimento sob ação de cargas repetidas e estáticas**. In: 18ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Porto Alegre. Anais. v.1. 1983.

CSN. **Companhia Siderúrgica Nacional**. Disponível em: <<http://www.csn.com.br/>>. Acesso em: 17 de setembro de 2017

ENTEICHE, A.A. **Suelo-cemento, su aplicacion en la edificacion**. Bogotá: CINVA, 1963. 99 p.

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

FERRAZ, A. L. N. **Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento**. 2004. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FILHO, A. W., **Materiais para a indústria da construção civil turma Eng. Civil – 3º Período**. — Transcrição da apresentação, 2011.

RAMIREZ, M. A. **Roteiro de laboratório da disciplina processamento de materiais cerâmicos**. Guaratinguetá: Departamento de Materiais e Tecnologia, 2013. 95 p.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa**. 2003. 165 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

HIGHWAY RESEARCH BOARD (HRB). **Soil stabilization with Portland cement**. Bulletin 292, Washington, D. C. 1961.

HWANG, C-L; HUYNH, T-P. **Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks**. Construction and Building Materials, v. 93, p. 335-341, 2015.

JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MURPHY, Gregory L. **Reasons to doubt the present evidence for metaphoric representation**. Cognition, v. 62, n. 1, p. 99-108, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. Foz do Iguaçu: Ibracon, 2008, 751 p.

MERCADO, M. C. **Solo-cimento: alguns aspectos referentes a sua produção e utilização em estudo de caso**. 1990. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MOREIRA, C. C. **Características e desempenho das escórias de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos**. 37ª Reunião Anual de Pavimentação/11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 37ª RAPv/11º ENACOR, Goiânia, Brasil, 2006

MOURA, P. R. M. **Estudo comparativo do comportamento do solo-cimento feito com um solo laterítico e um solo saprolítico**. 1987. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

NASCIMENTO R. M. **Estudo da aditivção do metacaulim de alta reatividade produzido por meio do método de calcinação flash em cimento Portland**. 2009. 88 f. Dissertação (Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 1997, 28p.

PARENTE, E. B. **Avaliação do comportamento mecânico das misturas de solo cimento e fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PCA. **Portland cement association. soil: cement construction handbook**. Illinois, 1969. 42p.

PEREIRA, R. S. **Ativação de cimento siderúrgico**. 2010. 41 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

PINTO, T. P. **Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento**. São Paulo: ABCP, 1980. 22p

PITTA, M. R. **Retração do solo-cimento**. In: 17ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília. Anais. Brasília, p. 1-67. 1982.

PRESA, M. B. **Resistência à compressão e absorção de água em tijolos de solo cimento**. 2011. 41 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

RANIERI, M. G. A., **Caracterização tecnológica das argilas da cidade de Cunha para fins de cerâmica artística**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo, Guaratinguetá, 2007.

RIGASSI, V. **Compressed earth blocks: Manual of Production**. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE, Alemanha, v. 1, 1985.

ROCHA, A. F. **Estudo experimental sobre misturas de solo-cimento para a região de Campo Novo dos Parecis, MT**. 1996. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SANTOS, A. C. V. V. dos. **Desenvolvimento de tijolos cerâmicos ecológicos com adição de escória de alto forno**. 2016. 72 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

SHI, C.; QIAN, J. **High performance cementing materials from industrial slags—a review**. Resources, Conservation and Recycling, v. 29, n. 3, p. 195-207, 2000.

SILVA, A. L. V. C e. **Termodinâmica aplicada a aciaria**. Universidade Federal Fluminense, 21p. 1998.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho com adição de sílica ativa: propriedades mecânicas, durabilidade e características da microestrutura**. 2000. 303 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SILVA, M. S. **A terra crua como alternativa sustentável para a produção de habitação social**. 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SILVA, S. A. M. **Estudo da compressão simples em corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-serragem**. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento**. 2006. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TANIGUCHI, Hiroaki et al. **Epigenetic inactivation of the circadian clock gene BMAL1 in hematologic malignancies**. Cancer research, v. 69, n. 21, p. 8447-8454, 2009.

TU, H. Y. et al. **$\text{Ln}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ (Ln= Sm, Dy) for the electrode of solid oxide fuel cells**. Solid State Ionics, v. 100, n. 3-4, p. 283-288, 1997.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos Materiais Cerâmicos**. Ed. Da Universidade de São Paulo. São Paulo: Blücher, 1973. 318 p.