

**DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS CERÂMICOS ECOLÓGICOS COM
ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

Guaratinguetá

2016

ANA CAROLINA VILLELA VIEIRA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS CERÂMICOS ECOLÓGICOS COM
ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso 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 a obtenção do título de
Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Ramírez Gil

Guaratinguetá
2016

S237d	Santos, Ana Carolina Villela Vieira dos Desenvolvimento de tijolos cerâmicos ecológicos com adição de escória de alto forno / Ana Carolina Villela Vieira dos Santos – Guaratinguetá, 2016. 68 f. : il. Bibliografia: f. 65-68 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil 1. Cerâmica (Tecnologia) 2. Resistência de materiais 3. Tijolos 4. Escoria I. Título CDU 666.3
-------	---

ANA CAROLINA VILLELA VIEIRA DOS SANTOS

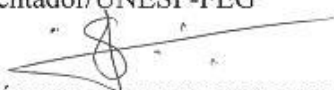
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

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. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP-FEG


Dr. CARLOS MANUEL ROMERO LUNA
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado forças para realizar essa graduação.

Gostaria de agradecer à minha família e amigos, por todo apoio desde o início do curso. Mesmo com os diversos acontecimentos durante os anos, nunca me deixaram desistir.

Ao meu orientador Prof. Dr. Miguel Angel Ramírez Gil pela disponibilidade e atenção na orientação.

À Domingos Hasmann Neto, técnico do Laboratório de Materiais Cerâmicos da FEG, por ter sempre me auxiliado durante a longa parte experimental.

À Luis Felipe Lameze, à Letícia Alves e à Felipe Barros, por ter ajudado no desenvolvimento de todo o trabalho.

À meu pai, Orlando Vieira dos Santos Júnior, que antes de partir me deu o incentivo maior para me tornar uma Engenheira de sucesso.

À meu namorado, Tiago Ferreira Barbosa, por me auxiliar em cada etapa do trabalho.

À minha mãe, Ana Beatriz Villela, dedicada e atenciosa, apoiando cada decisão tomada.

Por fim, a todos que de algum modo contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

Para a construção civil a utilização de tijolos queimados de argila ainda é alta, mas por um lado, consome grandes quantidades de energia devido o processo de queima. Tijolos não queimados (ecológicos) acabaram sendo uma alternativa para reduzir o consumo de energia. Sua composição, seu modo de utilização e outras vantagens fazem com que esse produto atenda aos três critérios constituintes do tripé da sustentabilidade: econômico, social e ambiental. O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e caracterizar amostras de referência de solo-cimento e, amostras de solo-cimento com substituições de cimento em teores de 25%, 50%, e 100% por escória de alto forno. Através do ensaio de flexão em três pontos, foi possível identificar os resultados com maior resistência. Para a idade de 28 dias, os valores mais altos foram: 10,80MPa; 8,9MPa; 7,0MPa; 4,4MPa, em ordem crescente dos valores de adição de escória de alto forno. Através de ensaios pôde-se notar que para absorção de água, apesar de identificado o aumento de seus valores conforme o aumento da substituição de cimento, todos os materiais foram aprovados em comparação com os requisitos da norma NBR 8491. Tal norma exige um máximo de 20% de absorção de água, sendo o maior valor encontrado equivalente a 14,82% para a amostra com 25% de substituição e 7 dias de idade. Esses valores indicam a possibilidade de substituição do cimento por escória de alto forno, sendo a substituição mais adequada a de 50%. Já a substituição total não é adequada devido ao seu comportamento em água não ser o esperado para tijolos ecológicos.

PALAVRAS-CHAVE: Tijolos ecológicos. Escória de alto forno. Resistência

ABSTRACT

For the construction industry the use of burnt clay bricks is still high, but on the one hand, it consumes large amounts of energy due to the burning process. Unburned (ecological) bricks turned out to be an alternative to reduce energy consumption. Its composition, its use and other advantages make this product meet the three criteria of the tripod of sustainability: economic, social and environmental. The main objective of this work was to develop and characterize soil-cement reference samples and soil-cement samples with cement substitutions at 25%, 50%, and 100% by blast furnace slag. Through the three point bending test, it was possible to identify the results with greater resistance. For the age of 28 days, the highest values were: 10.80MPa; 8.9MPa; 7.0MPa; 4.4MPa, in increasing order of the blast furnace slag addition values. Through the tests it was noted that for water absorption, although the increase of its values was identified as the cement substitution increased, all materials were approved in comparison with the requirements of standard NBR 8491. This standard requires a maximum of 20% water absorption, the highest value found being equivalent to 14.82% for the sample with 25% substitution and 7 days of age. These values indicate the possibility of replacement of the cement by blast furnace slag, with the most adequate replacement being 50%. Already the total replacement is not adequate because its behavior in water is not what is expected for ecological bricks.

KEY WORDS: Ecological bricks; Blast furnace slag; Resistance

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	8
1.1 INTRODUÇÃO	8
1.2 JUSTIFICATIVA	9
1.3 OBJETIVOS	10
2 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	12
2.1 ARGILA	12
2.1.1 Cerâmicas vermelhas e tijolos	14
2.2 CIMENTO	15
2.2.1 Hidratação do cimento Portland	17
2.2.2 Tipos de cimento Portland	18
2.2.3 Tijolo de solo-cimento	19
2.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS	20
2.3.1 Escória de alto forno	21
2.3.1.1 A Escória	21
2.3.1.2 O Cimento Portland com a Escória de Alto Forno	24
2.3.1.3 Propriedades importantes da Escória de Alto Forno.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 NORMAS	28
3.2 ETAPAS DO TRABALHO	29
3.3 MATERIAIS	30
3.3.1 Argila	30
3.3.2 Escória de Alto Forno	31
3.3.3 Cimento	32
3.4 MÉTODOS	33
3.4.1 Difractometria de raios X	33
3.4.2 Picnometria líquida	33

3.4.3 Distribuição granulométrica da argila	34
3.4.4 Limites de Atterberg	34
3.4.6 Fabricação dos corpos de prova	35
3.4.7 Ensaio de flexão	42
3.4.8 Caracterização dos corpos de prova de flexão por testes de Arquimedes.....	45
3.4.9 Teste de absorção de umidade.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	49
4.1.1 Argila	49
4.1.2 Escória de alto forno	50
4.1.3 Cimento	50
4.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG DA ARGILA	51
4.3 DENSIDADE DAS MATÉRIAS-PRIMAS POR PICNOMETRIA LÍQUIDA.....	53
4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO	54
4.6 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE UMIDADE	57
4.7 CARACTERIZAÇÃO POR ENSAIO DE ARQUIMEDES.....	59
5 CONCLUSÕES.....	62
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS	65

1 APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Oferecer suporte ao assentamento das obras de Engenharia Civil é um dos requisitos de um solo. Além disso, o solo de um determinado terreno fornece, também, a matéria-prima necessária para a fabricação de vários materiais utilizados nas diversas fases dessas construções. O tijolo cerâmico é um típico exemplo de tal versatilidade.

Um material cerâmico é um tipo de material inorgânico, não metálico, compostos normalmente de elementos metálicos e um não metálico. Os materiais cerâmicos podem ser cristalinos ou parcialmente cristalinos. São bons isolantes e também têm a propriedade de ter uma temperatura de fusão e resistência muito elevada. Além disso, o seu módulo de Young (tendendo ao limite elástico que se forma em um ensaio de tração) também elevado, também mostram um modo de ruptura frágil. (CARTER E NORTON, 2013)

Atualmente, apesar dos avanços feitos com concreto armado e metais, o emprego do tijolo cerâmico ainda ocupa uma posição importante. De fato, é um dos componentes básicos de qualquer construção de alvenaria, seja ela de vedação ou estrutural, possuindo dimensões e formatos variados. Os tijolos são, assim, blocos de construção antigos a serviço do homem moderno.

A conscientização do ser humano em relação ao uso de novas técnicas construtivas vem ao encontro da preservação da natureza. Sabe-se que rejeitos industriais é um problema no mundo todo, e que a reutilização destes pode garantir um menor impacto ambiental (ACCHAR et al., 2009).

O Brasil possui uma variada produção de substâncias minerais, podendo-se destacar: ferro, ouro, chumbo, prata, carvão, agregados para a construção civil, gipsita e cassiterita. A preocupação com a preservação do meio-ambiente, combinada com a falta de algumas matérias-primas, está impulsionando as pesquisas para reutilização ou adição dos rejeitos em processos industriais. Em muitos casos, a reutilização de rejeitos é dificultada pelas impurezas ou contaminações incorporadas durante seu processamento, por isso, a preocupação de um estudo prévio da utilização ou adição desses rejeitos. (CHAVES, 2009)

Portanto, nesta pesquisa, serão feitos tijolos de solo-cimento com a substituição parcial ou total do cimento pela escória de alto forno. Para se obter dados concretos, foram caracterizados os corpos de prova com e sem escória, visando a viabilidade do processo.

1.2 JUSTIFICATIVA

O setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais é a indústria da construção, apontada pelo Conselho Internacional da Construção (CIB). Há também inúmeros impactos além dos relacionados ao consumo de matéria e energia, como os associados à geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Tais aspectos ambientais, somados à qualidade de vida que o ambiente construído proporciona, sintetizam as relações entre construção e meio ambiente. (OLIVEIRA, 2015)

Uma das atividades que mais impactam negativamente o meio ambiente é a construção civil, mas apesar disso, suas necessidades continuam em crescimento constante. Déficit habitacional, ampliações e reformas de escolas e hospitais, novas construções para atender o crescimento urbano, desenvolvimento econômico e aumento dos edifícios corporativos, entre outros, ilustram algumas demandas da atividade. Uma das formas de se contribuir com o desenvolvimento sustentável do setor são as escolhas e usos conscientes dos materiais de construção. Sua contribuição é justificada uma vez que representam os principais elementos da edificação que ditam seus impactos ao meio ambiente durante todo seu ciclo de vida. (TORGAL, 2010)

A corrente preocupação ambiental por parte dos governos, setor privado e população, tem levado à constante procura por práticas menos agressivas ao meio ambiente. Segundo pesquisa da revista Business Week, realizada em 2006, constata-se que as próximas gerações aumentarão a demanda por itens ligados a sustentabilidade, sendo que dos entrevistados, 89% afirmaram que escolhem marcas associadas a esse conceito (FEBRABAN, 2010). Os esforços na redução do consumo desses recursos devem estar focados nos projetos, para torná-los mais eficientes. Edificações que utilizem menos recursos naturais, materiais e energia, e que sejam confortáveis e saudáveis para viver e trabalhar, são contribuições desejadas. Sendo assim, a

incorporação de práticas de sustentabilidade na construção é uma tendência crescente no mundo.

Os tijolos solo-cimento são compostos a maioria por argila. A abundância de argila e a concentração de artesãos na cidade de Cunha (Estado de São Paulo) faz com que a mesma seja conhecida por sua tradição em cerâmica artística e artesanal, possuindo a maior concentração de fornos do tipo Noborigama da América do Sul, que são grandes fornos orientais a lenha.

Através de estudos realizados dentro do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UNESP – Guaratinguetá, houve a caracterização das argilas de Cunha, podendo ser citada a dissertação de RANIERI (2007), que levantou informações importantes sobre o material e sua composição.

Na dissertação de BARROS (2016), foi estudado o efeito da adição de cinza de casca de arroz para a substituição total e parcial 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 objetivo principal desse trabalho é fabricar e caracterizar mecânica e fisicamente corpos de prova de solo-cimento, substituindo cimento por teores de escória de alto forno, avaliando-se a viabilidade técnica para futura aplicação no desenvolvimento de tijolos ecológicos de solo-cimento.

Específicos:

- Utilizar rejeitos da escória de alto forno, como forma de minimizar agressões ao meio ambiente;
- Beneficiar e caracterizar as matérias primas usadas na fabricação dos corpos de prova por meio de análises de composição por difratometria de raios X, análise granulométrica e picnometria líquida;

- Otimizar cada etapa de processamento (mistura das matérias primas, prensagem, secagem e cura) levando em consideração as características das matérias primas e a geometria dos corpos de prova;
- Caracterizar os corpos de prova do ponto de vista mecânico mediante testes de flexão em três pontos e do ponto de vista físico, no que se refere à densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGILA

Os solos de natureza argilosa apresentam características de plasticidade, ou seja, ao ser misturado à água adquirem a forma desejada, a qual se mantém após secagem e cozimento. Assim, a primeira característica usada na Engenharia para se diferenciar os solos 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 DAS PARTICÚLAS (mm)
Areia	De 0,05 a 4,8
Silte	De 0,005 a 0,05
Argila	Inferior a 0,005

Fonte: SANTOS, 1989

Assim, de acordo com a ABNT, as argilas são compostas de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005mm. Do ponto de vista químico, porém, durante muito tempo se conceituou que argilas eram substâncias originárias da caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e o resto era impureza amorfa. Hoje se sabe que as argilas são constituídas essencialmente de partículas cristalinas extremamente pequenas, formadas por um número restrito de substâncias. Essas substâncias são chamadas argilo-minerais que, por sua vez, são silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, comumente com alguma porcentagem de álcalis e de alcalino-terrosos. 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 argilo-minerais. 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 argilo-mineral apresentam uma forte tendência a causar trincas de secagem, além de apresentar elevada plasticidade.

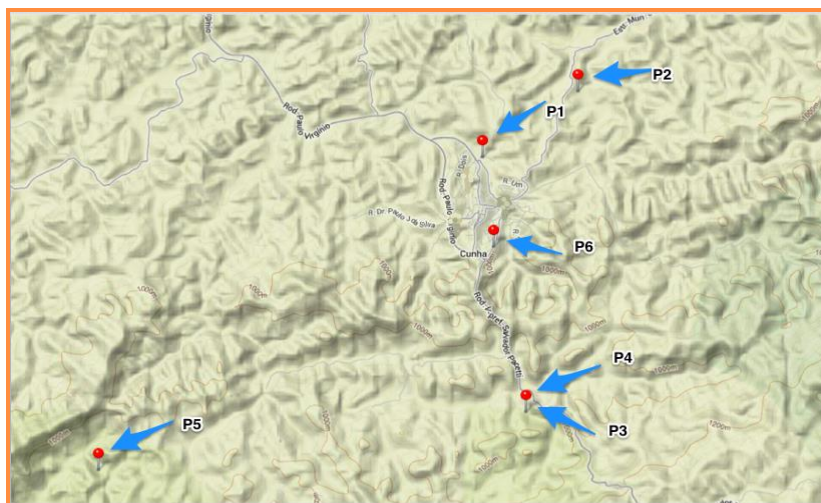
Na dissertação de Barros (2016) e Ranieri (2007), tem-se a composição de duas argilas, ambas coletadas em pontos diferentes da cidade de Cunha, nota-se a presença de quartzo e os argilominerais são representados por gibbsita, caulinita e moscovita.

É importante ressaltar que os termos “argila” e “solo” possuem certa semelhança, mas ainda assim, diferenças, o que se faz necessário um certo esclarecimento sobre o assunto. Nota-se a diferença na área que esse material será utilizado. O termo “solo” tem maior uso na Engenharia Civil, onde é utilizado 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”. Já a argila é denominada, de acordo com a mesma norma, o “solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade”. (ALMEIDA, 2005)

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”.

Para a escolha da argila, a coleta foi feita em seis pontos estratégicos na cidade de Cunha (Estado de São Paulo), como demonstra a Figura 1. Através das análises feitas no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UNESP – Guaratinguetá e com a ajuda dos conhecimentos prévios dos ceramistas da região de Cunha, optou-se por escolher o ponto 5.

Figura 1 – Pontos de coleta da argila de Cunha



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.1.1 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. O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país. 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, 2012; BNB 2010). 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, 2012).

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, 2012)

2.2 CIMENTO

A palavra cimento é originada do latim *caementu*, que na antiga Roma designava uma espécie de pedra natural de rochedos não esquadrejada (quebrada) (SNIC, 2003). Foi em meados de 1830 que o 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. O resultado foi um pó que, por apresentar cor e características semelhantes a uma pedra abundante na Ilha de Portland, foi denominado “cimento Portland”.

A partir daí, seu uso e sua comercialização cresceram de forma gradativa em todo o mundo (SNIC, 2003). 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 Usina Rodovalho, operou de 1888 a 1904 e foi extinta definitivamente em 1918. O desenvolvimento do Brasil no fim do século XIX já exigia a implantação de uma indústria nacional de cimento. 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. Há tempos havia no Brasil, praticamente, um único tipo de cimento portland. Com a evolução dos conhecimentos técnicos sobre o assunto, foram sendo fabricados novos tipos. 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 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

Cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. 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). Por definição, é um “aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer Portland, gesso e adições normatizadas finamente moídas” (MARTINS et al., 2008). Aglomerante porque tem a propriedade de unir outros materiais. Hidráulico porque reage (hidrata) ao se misturar com água e depois de endurecido ganha características de rocha artificial, mantendo suas propriedades, principalmente se permanecer imerso em água por aproximadamente sete dias (MARTINS et al., 2008). As matérias primas utilizadas na fabricação de cimento devem conter Cálcio (Ca), Silício (Si), Alumínio (Al) e Ferro (Fe), pois são estes os elementos químicos que, combinados, vão produzir compostos hidráulicos ativos. Os materiais corretivos mais empregados na indústria do cimento são areia, bauxita e minério de

ferro. A areia é utilizada quando ocorre deficiência em SiO_2 ; a mistura de óxidos de alumínio hidratados é utilizada quando ocorre deficiência em alumínio nas matérias primas; e o minério de ferro (geralmente hematita) é utilizada quando ocorre deficiência em ferro (MARTINS et al., 2008).

2.2.1 Hidratação do cimento Portland

Segundo Neville (1997), em termos gerais, pega refere-se à mudança do estado fluido para um estado rígido. Endurecimento refere-se ao aumento de resistência de uma pasta de cimento após a pega.

Na presença de água, os silicatos e os aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente.

A hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF) na presença do gesso adicionado na fabricação do cimento – resulta na formação de etringitas que assumem formas de agulhas e começam minutos após o início da hidratação, sendo estas responsáveis pelo fenômeno da 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ forma grandes cristais prismáticos.

Segundo Aïtcin (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. Isto deve-se ao fato de alguns grãos de cimento que não reagiram estarem cobertos por uma camada de hidratos (que se torna cada vez mais espessa com o passar do tempo), camada esta que dificulta as moléculas de água chegarem às partes não hidratadas. 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. (AITCIN, 2000)

2.2.2 Tipos de cimento Portland

Na Tabela 2, observa-se os tipos de cimento Portland e suas composições.

O cimento utilizado para este trabalho foi o CP V-ARI. Assim como o CP-I não contém adições (porém pode conter até 5% em massa de material carbonático).

Tabela 2 – Composições do cimento Portland

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escória siderúrgica (%)	Material pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I - S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II - E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II - Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II - F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5

CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: ECIVIL, 2016.

O CP V-ARI 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).

2.2.3 Tijolo de solo-cimento

Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, devendo ser selecionado de modo que permita o menor consumo possível de cimento. Segundo Pinto (1980) o solo ideal deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, sendo que os solos arenosos bem graduados e com razoável quantidade de silte mais argila, são os mais indicados, de vez que exigem baixo consumo de cimento. 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: grãos com diâmetro máximo de 7,5 mm; 50% dos grãos passando na peneira n. 4 (4,8 mm); de 15 a 100% dos grãos passando na peneira n. 40 (0,42 mm); menos de 50% dos grãos passando na peneira n. 200 (0,075 mm); limite de liquidez – $LL \leq 40\%$; e índice de plasticidade – $IP \leq 18\%$.

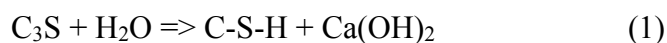
Quando o solo não possui essas características, muitos autores consideram a possibilidade de se efetuarem correções na sua granulometria, através da composição

com solos mais arenosos ou mesmo a adição de areia grossa, de modo que o resultado seja favorável, técnica e economicamente (FERRAZ, 2004).

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).

2.3 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 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 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):





2.3.1 Escória de alto forno

2.3.1.1 A Escória

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. Como pode ser visto, os principais componentes são os mesmos encontrados no cimento Portland. As escórias de alto forno podem ser classificadas de acordo com a relação CaO/SiO_2 (óxido de cálcio e sílica) em ácidas (<1), normalmente produzidas em processos a carvão vegetal, ou básicas (>1) de produtos (JOHN, 1995). A escória utilizada para este trabalho é considerada escória básica.

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

A escória sai do alto forno na forma de um líquido viscoso com temperatura entre 1350°C e 1500°C contendo 1700 kJ/kg de energia térmica. Se resfriada

lentamente, esta energia vai ser perdida para a atmosfera e liberada através da cristalização do líquido, formando cristais diversos, como mervinita, melilita, silicato dicálcico, diopsídio (nas escórias ácidas), entre outros. Na condição cristalina a escória não possui capacidade aglomerante, sendo utilizada como agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas.

Se resfriada bruscamente, de forma que não haja tempo hábil para que o arranjo cristalino ocorra, produz-se um material predominantemente vítreo. A escória vítrea apresenta nível de energia mais elevado do que a cristalina, porque retém a energia de cristalização de aproximadamente 200 kJ/kg, sendo portanto termodinamicamente menos estável que as cristalinas (JOHN, 1995).

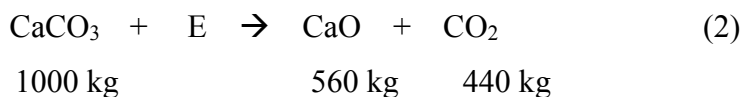
Dentre os produtos pozolânicos conhecidos, a escória de alto forno caracteriza-se por sua aplicação em composição do cimento Portland e na constituição do concreto para mitigação da reação álcali-agregado. A escória granulada de alto-forno é um subproduto gerado na fabricação do gusa em alto-forno, onde 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: o gusa apresenta densidade superior a 7g/cm³ e a escória com densidade em torno de 2,8g/cm³. Dessa maneira, a escória “flutua” no topo do ferrogusa, podendo ser drenada separadamente em intervalos regulares. (SALLES & MIZUMOTO, 2012)

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 lentamente¹ 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. 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 11,8Mton de escória de alto forno produzidas anualmente é resfriada lentamente e comercializada como agregado.

O principal mercado de consumo da escória de alto forno obtida com coque mineral é a indústria cimenteira, sendo esta uma importante forma de aproveitamento deste resíduo. A produção anual de cimento gera aproximadamente 7,9% de toda a emissão de gás carbônico no mundo inteiro, sendo que metade disto resulta da calcinação do calcário e o restante provém do uso de combustíveis fósseis na produção do clínquer (ERHERENBERG e GEISLER, 1999). A 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 sócio-econômicas (AİTCIN, 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.

2.3.1.2 O Cimento Portland com a Escória de Alto Forno

A mistura da escória granulada moída com o clínquer Portland é uma das formas mais antigas de reciclagem da escória. Atualmente a reciclagem na produção de cimento consome boa parte das escórias geradas no Brasil, mas ainda existem sobras significativas e enormes pilhas de estoque. 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 YAMAMOTO 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.

2.3.1.3 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 grãos muito finos, 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) contribuem 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 (SETIÉN, 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 os grãos. 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 a sua composição química. Escórias mais básicas apresentam então, resistências mecânicas melhores (SILVA, 1998).

Segundo Moreira e Costa (2006), no estudo do aproveitamento da escória de alto forno para fabricação de material cerâmico, chegou-se a 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. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 NORMAS

As normas a seguir servem como base para a fabricação de tijolos de solo-cimento e para a fabricação de tijolos ecológicos, pois citam, além de processos de fabricação, propriedades adequadas para o emprego de tijolos sem função estrutural. Para base desse projeto, tais normas também são utilizadas, mas como se trata de uma análise de um material proposto, o tijolo será fabricado nas dimensões de um corpo de prova.

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

ABNT NBR 10833: Fabricação de tijolo solo-cimento com utilização de prensa manual hidráulica;

ABNT NBR 10834: Bloco vazado de solo cimento sem função estrutural;

ABNT NBR 10835: Bloco vazado de solo cimento sem função estrutural – forma e dimensões;

ABNT NBR 10836: bloco vazado de solo cimento sem função estrutural - determinação à compressão e absorção de água;

As normas que se referem aos materiais utilizados para fabricar o tijolo proposto no trabalho, tanto para sua preparação quanto para sua caracterização, são:

ABNT NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial;

ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica;

ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade;

ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez;

ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos;

ABNT NBR 12023: Solo-cimento – ensaio de compactação;

ASTM D3282: *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*

ASTM C114 - 15: *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*;

ASTM D854 – 02: *Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.

Para os ensaios mecânicos e de absorção de água, análise de resistência à umidade e de porosidade aparente, foram tomadas como base as seguintes normas:

ABNT NBR 10836: Bloco vazado de solo cimento sem função estrutural - determinação à compressão e absorção de água;

ABNT NBR 8491: Tijolo maciço de solo - cimento;

ASTM C1161-13: *Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature*;

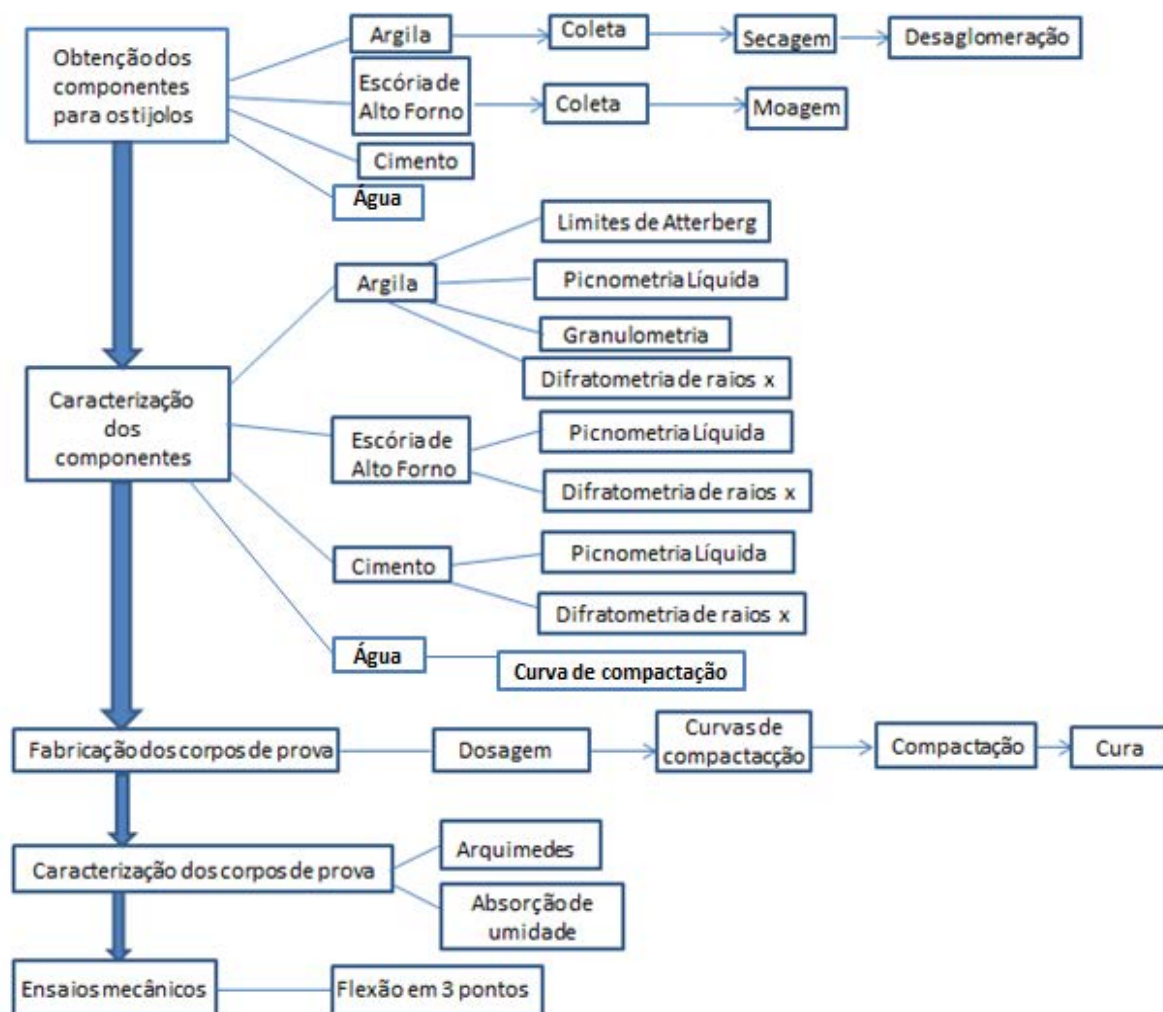
ASTM C20 - 00: *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*;

Aqui cabe a observação de que a norma ASTM foi usada como base para a análise de porosidade aparente, sofrendo algumas modificações no processo. Isso porque a norma é direcionada para materiais não cimentícios e que não reagem com a água. Sendo assim, a água foi substituída por querosene como líquido a penetrar nos poros. Também não foi aplicado calor para a penetração do líquido nos poros, como seria feito no teste com água.

3.2 ETAPAS DO TRABALHO

De acordo com a Figura 2 tem-se ilustrado resumidamente cada etapa que foi realizada neste trabalho.

Figura 2: Esquemática das etapas desenvolvidas no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Argila

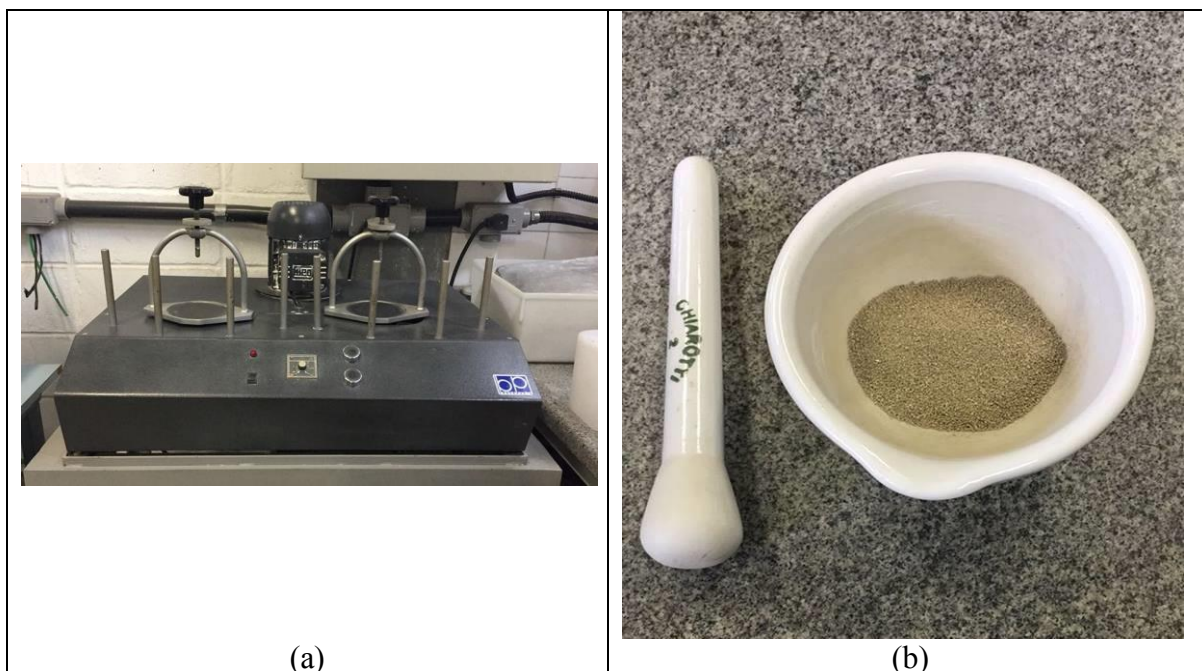
A argila foi escolhida em pontos específicos, de acordo com o interesse e conhecimento prévio dos ceramistas envolvidos da cidade de Cunha - SP, e o estudo da potencialidade para diversas aplicações tecnológicas.

Buscou-se uma homogeneidade da amostra e a ausência de impurezas observadas a olho nu, tais como folhas e galhos.

Essas amostras foram inicialmente destorroadas manualmente em almofariz, como mostra e depois seguiram para desaglomeração em moinho vibratório, ilustrado

na Figura 3(a). O tempo de permanência do material no processo de moagem foi em torno de uma hora. Para a produção dos corpos de prova a argila foi peneirada na peneira de abertura 0,425 mm (ABNT 40). Na Figura 3(b) tem-se o material após ter passado pelo moinho vibratório e peneiramento.

Figura 3: Sequência de preparação da argila: (a) moinho vibratório; (b) argila após moagem e peneiramento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

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, 2016)

A escória de alto forno passou pelo moinho vibratório, por 2 h, com intervalos. Passado 30 min, era dado um descanso de 15 min para então moer por mais 30 min, até completar as 2 horas. Então, as partículas foram passadas por uma peneira de malha 200 Abertura: 0,075mm 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 4, tem-se a escória de alto forno após todo o processo.

Figura 4: Escória de alto forno peneirada



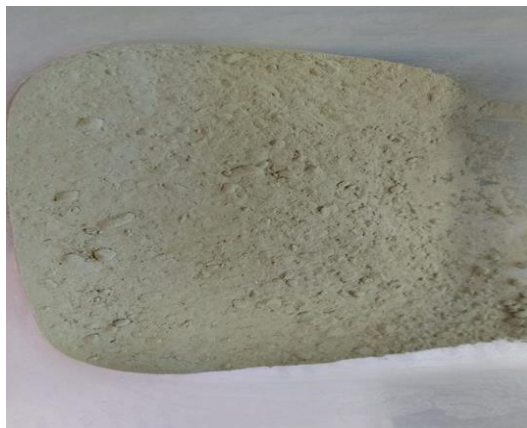
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.3 Cimento

O cimento utilizado foi adquirido em uma loja idônea 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.

Para a fabricação dos corpos de prova, todo o material foi peneirado na peneira de abertura de 0,075 mm (ASTM 200). Na Figura 5 pode-se observar o cimento após o peneiramento pronto para utilização.

Figura 5: Cimento peneirado



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Difratometria de raios X

As matérias-primas utilizadas (argila, escória de alto forno e cimento) foram analisadas pelo método de difratometria de raios X usando um difratômetro Bruker D8 Advanced, com radiação $\text{CuK}\alpha$ disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP-FEG. Para isso, os materiais foram preparados sendo passados em peneira de abertura de 0,075 mm de abertura (ABNT 200). Os parâmetros utilizados na análise são listados a seguir:

- Voltagem: 40 kV;
- Corrente: 25 mA;
- Passo: de 0,02 °/s;
- Rotação da amostra: 15 rpm;
- Tempo de leitura: 0,35 s/passo;
- Intervalo de ângulos de leitura: 10°-90°.

A técnica de difratometria de raios X foi importante para caracterizar as fases presentes nas matérias primas, indicando se as mesmas poderiam ser utilizadas neste trabalho.

3.4.2 Picnometria líquida

A picnometria líquida foi realizada após a preparação dos materiais de forma a obter seus valores de densidade. O método foi aplicado com base na norma ASTM D854-02. Este consiste no uso de um picnômetro de 100 ml calibrado, onde é colocado o material a ser analisado na forma de pó. Preenche-se o picnômetro com um líquido adequado e fecha-se o picnômetro sem que fique alguma bolha retida. No caso da argila o líquido utilizado foi a água destilada. Já no caso da escória de alto forno e do cimento, que são materiais que reagem com a água, a mesma foi substituída por querosene.

O picnômetro foi pesado vazio (w_0), com o material na forma de pó (w_1), com o líquido (w_2) e com o material em pó mais o líquido (w_3). A densidade (D) do material foi dada de acordo com a Equação (2), onde D_L é a densidade do líquido e D_A a densidade do ar, sendo feitas três medidas para cada material.

$$D = \{(w_1 - w_0) / [(w_3 - w_0) - (w_2 - w_1)]\} * (D_L - D_A) + D_A \quad (2)$$

3.4.3 Distribuição granulométrica da argila

A análise granulométrica foi realizada no Departamento de Engenharia Civil da UNESP-FEG. Primeiramente foi realizado o peneiramento mecânico em uma série de malhas. Depois as frações mais finas foram analisadas seguindo o método de sedimentação, preconizado pela norma ABNT NBR 7181.

3.4.4 Limites de Atterberg

Limite de Consistência, também conhecido como limite de Atterberg, é um método de avaliação criado por Albert Atterberg, onde por meio de testes e ensaios é possível definir o LL, LP, LC. Tem grande importância para a mecânica dos solos mesmo sendo de natureza fundamentalmente empírica, pois assim pode-se determinar o IP. Quando o solo tem um elevado nível de água esta em seu estado elástico, onde tudo pode ser moldado nele e ele voltara a sua fase inicial, a medida que a água vai evaporando ele chega ao LL, perdendo sua capacidade de fluir mais pode ser moldado facilmente e conserva a sua forma. Agora o solo esta no estado plástico, mais continua a perder água ate chegar ao LP, onde ao ser trabalhado o solo se desmancha, este é o

estado semissólido. O limite entre os dois estados é um teor de umidade igual ao limite de contração (LC)

O Limite de Liquidez (LL) é definido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico; é a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande. Onde são feitas varias tentativa, com diferentes níveis de umidade, onde a ranhura se fecha com diferentes números de golpes.

O Limite de Plasticidade (LP) é tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço; é a umidade de transição entre os estados plástico e semissólido do solo. Em laboratório o LP é obtido determinando-se o teor de umidade no qual um cilindro de um solo com 3mm de diâmetro e cerca de 10cm de comprimento apresenta-se fissuras. (PINTO, 2006)

Para a análise do Limite de Liquidez e do Limite de Plasticidade, conhecidos com Limites de Atterberg, foram realizados os testes preconizados pela ABNT 6459:2016 e ABNT 7180:2016. Esses testes foram importantes para caracterizar o solo de acordo com a ASTM D3282, a qual relaciona os valores encontrados com os tipos de solo, tais como arenosos ou argilosos. Também foi importante para identificar se o solo utilizado aqui segue as recomendações da norma ABNT NBR 10833 para solos para aplicação em tijolos.

3.4.6 Fabricação dos Corpos de Prova

3.4.6.1 Dosagem do cimento

O primeiro passo para o cálculo das composições foi definir a quantidade de cimento a ser utilizada nos corpos de prova de referência formados por argila e cimento. Para definir essa quantidade foram levantados estudos da literatura e normas. Os métodos de dosagem são muito variados, mas se destacam as seguintes recomendações:

- A ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (1988), recomenda para a fabricação de tijolos ecológicos que sejam moldados corpos de prova para análise da resistência à compressão com traços de 1:10, 1:12 e 1:14 de cimento:solo e, recomenda

que seja escolhido o traço que utiliza a menor quantidade de cimento desde que sejam atendidos os requisitos de resistência à compressão da norma ABNT NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1988).

- A norma ABNT NBR 12253 cita que para solos argilosos do tipo A4 a quantidade de cimento para estabilizá-lo vai de 8% a 12% em massa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

Dentre as recomendações apresentadas, optou-se pela norma ABNT NBR 12253, pois o solo utilizado nesse trabalho é do tipo argiloso, que necessita de maiores teores de cimento para ser estabilizado se comparado aos solos arenosos. Além disso, mesmo sendo classificado como solo argiloso do tipo A6, que não é contemplado por essa norma, sendo mais fino que o argiloso do tipo A4, houve aqui a intenção de avaliar se esse solo pode ser utilizado para a fabricação de tijolos de solo-cimento, mesmo que a norma não o contemple. Sendo assim, foi escolhido o teor de 10% de cimento em massa.

3.4.6.2 Cálculo das composições

A partir da composição de referência, isto é, com 10% de cimento + 90% de argila em volume, parcelas de cimento foram sendo substituídas pela escória de alto forno 25%, 50%, e 100%. Como o sistema “cimento + argila + escória + água” é complexo, pois há silicatos e óxido de cálcio no cimento e na argila, além da sílica e do óxido de cálcio da escória, é difícil prever as reações que irão ocorrer e os tipos de C-S-H que serão formados. Na Tabela 4 tem-se como foi elaborada cada composição dos corpos de prova em teor volumétrico e o nome dado para as composições.

Tabela 4: Composição dos corpos de prova em teor volumétrico

Nome da Composição	Argila (%)	Cimento (%)	Escória (%)
CE 0 (Escória = 0%)	90	10	0
CE 2,5 (Escória = 2,5%)	90	7,5	2,5
CE 5 (Escória = 5%)	90	5	5
CE 10 (Escória = 10%)	90	0	10

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Considerando o volume real do corpo de prova utilizado de 1,133cm³, tem-se o volume real para cada composição na Tabela 5.

Tabela 5: Volume real da composição dos corpos de prova

	Argila (cm³)	Cimento (cm³)	Escória (cm³)	Total (cm³)
CE0,0	1,0197	0,1133	0	1,133
CE2,5	1,0197	0,0849	0,02832	1,133
CE5,0	1,0197	0,5665	0,05665	1,133
CE10	1,0197	0	0,1133	1,133

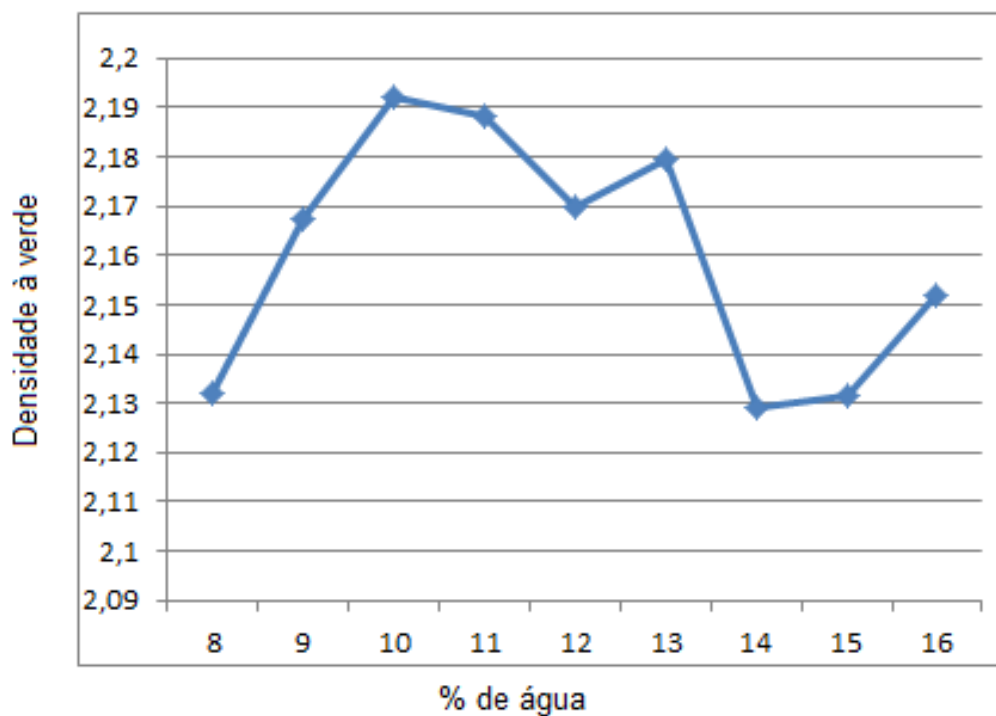
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O cálculo da quantidade de água a ser utilizada para a compactação dos corpos foi feito com base na norma ABNT 12023, utilizando-se das curvas de compactação. Trata-se de uma curva que leva em consideração a densidade à verde de corpos de prova feitos com quantidade de água variável, compactados com uma carga arbitrária.

A quantidade de água a ser utilizada para a compactação é aquela correspondente a densidade à verde máxima. A quantidade ótima de água para a compactação varia de acordo com a composição. De acordo com a Figura 6, a quantidade ideal de água para compactação é de 10% em massa, ponto máximo da curva.

A curva foi levantada de acordo com a média dos corpos de prova por ponto, utilizando-se de uma carga arbitrária de 20 kN (equivalente à 95,9 MPa de tensão) para a compactação.

Figura 6: Curva de compactação da densidade a verde em função da quantidade de água (%).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4.6.3 Mistura dos componentes

A mistura dos componentes foi feita por partes de forma manual em almofariz, seguindo os seus respectivos sistemas:

- **CE 0:** A argila, previamente seca em estufa à 110°C por uma hora e resfriada até a temperatura ambiente foi misturada ao cimento, adicionando-se água.

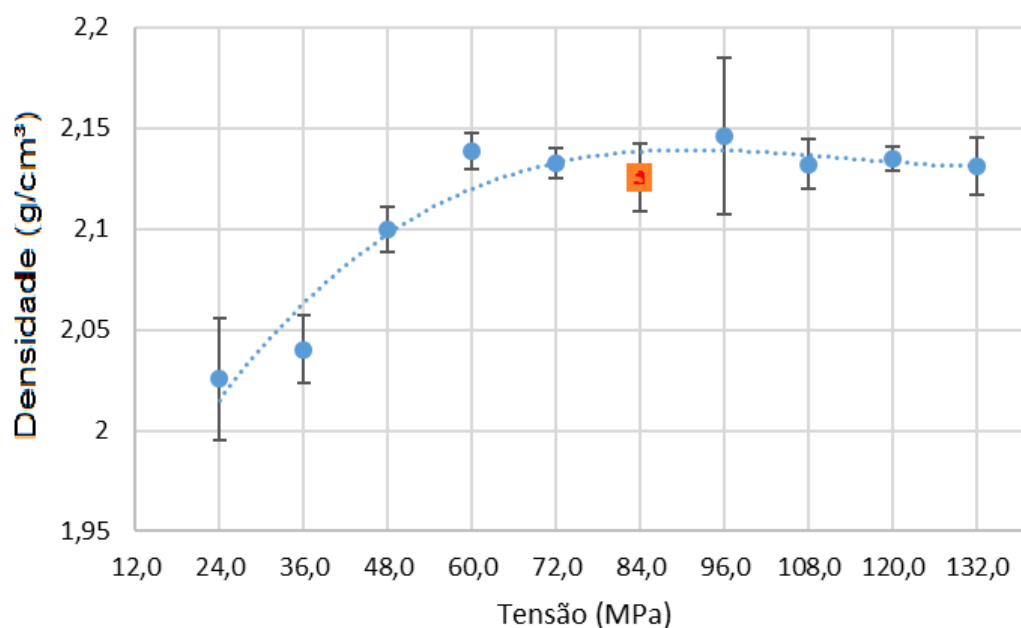
- **CE 2,5 e 5:** primeiro adicionou-se água a escória deixando a mistura em repouso por aproximadamente 30 minutos, tempo no qual as reações entre os componentes pôde acontecer para formar o C-S-H teórico. Após essa etapa, a argila, previamente seca em estufa a 110°C por uma hora e resfriada até a temperatura ambiente, foi misturada ao cimento e, por fim, essa mistura de cimento e argila foi adicionada à suspensão de escória e água.

- **CE 10:** adicionou-se água à escória e deixou a mistura em repouso por alguns minutos. Após essa etapa, a argila, previamente seca em estufa a 110°C por uma hora e resfriada até a temperatura ambiente foi misturada à escória com água.

3.4.6.4 Compactação dos corpos de prova

Para saber a carga a ser utilizada para compactar os corpos de prova, foram feitas também, curvas de compactação. A carga ideal para compactar os corpos de prova é a menor carga na qual a densidade à verde máxima é atingida. De acordo com a curva levantada, ilustrada na Figura 7, a tensão ideal para a compactação equivale a 83,9 MPa, indicado pelo ponto vermelho (o que equivale a uma aplicação de 17,5 kN), levando em conta as dimensões do molde, de 5,1 mm x 40,1 mm em sua área perpendicular à aplicação da carga. Essa carga foi adotada para as demais composições também, a fim de padronizar e diminuir as variáveis do processamento.

Figura 7: Curva de compactação da densidade em função da tensão de compactação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A compactação dos corpos de prova foi feita em uma prensa hidráulica, como ilustrada na Figura 8. O molde utilizado foi de aço temperado com as dimensões de 51mm x 40,1mm e altura variável. Esse molde, ilustrado na Figura 9, gera uma prensagem de efeito simples (NORTON, 1973).

Figura 8: Prensa hidráulica



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 9: Molde utilizado neste trabalho: (a) molde preparado, (b) cavidade do molde, (c) molde desmontado



(a)



(b)

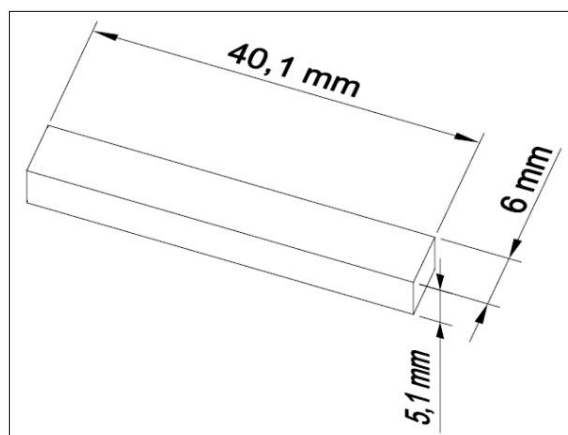


(c)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para fabricar os corpos de prova, uma quantidade da mistura previamente pesada foi colocada no molde, até que sua cavidade fosse totalmente preenchida. Após a prensagem de três corpos de prova nas condições ideais definidas, foram medidas as suas dimensões, que são apresentadas na Figura 10. Os demais corpos de prova foram produzidos respeitando-se essas dimensões, com a intenção de padronizar os corpos de prova. Na Figura 11 pode-se observar o tamanho real dos corpos de prova após a prensagem.

Figura 10: Dimensões dos corpos de prova produzidos nesse trabalho.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 11: Alguns corpos de prova com composições variadas após prensagem

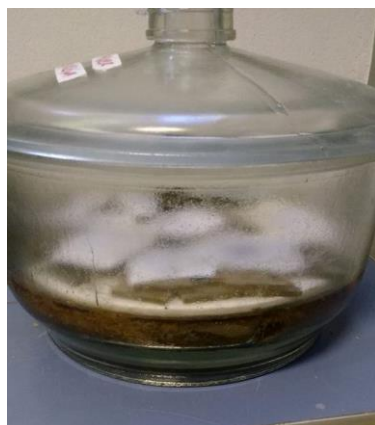


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Foi utilizada uma pré-carga de 2,45 kN por 30 segundos, que gera uma tensão de 12 MPa. Essa carga foi aliviada e a carga definida pela curva de compactação foi aplicada em seguida por um minuto, extraíndo-se o corpo de prova após esse processo.

A etapa seguinte consistiu em armazenar os corpos de prova em uma câmara úmida. Neste caso, como adaptação, foi utilizado um dissecador com serragem e água para garantir a umidade, no compartimento da base, ilustrado na Figura 12. Foram deixados em cura até que atingissem a idade adequada para serem ensaiados, isto é, 7 dias, 14 dias e 28 dias. De acordo com a NBR 12024:2012, a umidade da câmara deve ser mantida em 95%. Houve uma monitoria da umidade com higrômetro e registrada uma média de 86,5%, valor considerado adequado.

Figura 12: Dissecador utilizado como câmara utilizada para armazenamento dos corpos de prova.

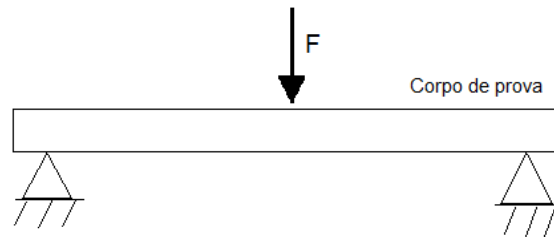


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4.7 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP. O tipo de ensaio foi o de flexão por três pontos, como ilustrado na Figura 13. Para tanto, foram selecionados 30 corpos de prova de cada composição para todas as idades, contabilizando um total de 120 corpos de prova fabricados. A preparação dos corpos de prova foi feita lixando-se suas arestas em lixa de 600 mesh, de tal forma que as rebarbas presentes pudessem ser eliminadas e sem comprometer o formato dos corpos de prova.

Figura 13: Esquemática do ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O equipamento utilizado foi o Shimadzu Autograph AG – X, mostrado na figura 14 com os seguintes parâmetros: Célula de carga de 5 kN; Velocidade da deslocamento do pistão de 0,5 mm/min; Distância entre os apoios do corpo de prova igual a 21 mm.

Figura 14: Shimadzu Autograph AG - X



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A tensão de ruptura (σ), isto é, tensão com a qual o material se rompe, é dada pela Equação (3), onde F é a força de ruptura, L é a distância entre os apoios do corpo de prova e b e h são, respectivamente, a largura e a altura do corpo de prova.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3)$$

A partir desses valores, foi feita a análise estatística de Weibull, que calcula a probabilidade de falha de um corpo de prova de acordo com a Equação (4), onde σ_0 é a resistência característica do material, sendo análoga a média para uma distribuição

gaussiana e m é módulo de Weibull, que representa a dispersão de resultados, sendo análogo ao desvio padrão na distribuição gaussiana (WEIBULL, 1951).

$$P=1-\exp[-(\frac{\sigma}{\sigma_0})^m] \quad (4)$$

Com base nessa equação e por meio da regressão linear, obtém-se a Equação (5), sendo P_i o estimador de probabilidade, calculado com base na Equação (6), onde N é o número de corpos de prova e i o número do corpo de prova de 1 a 30 em ordem crescente de σ :

$$\ln[\ln(\frac{1}{1-P_i})] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (5)$$

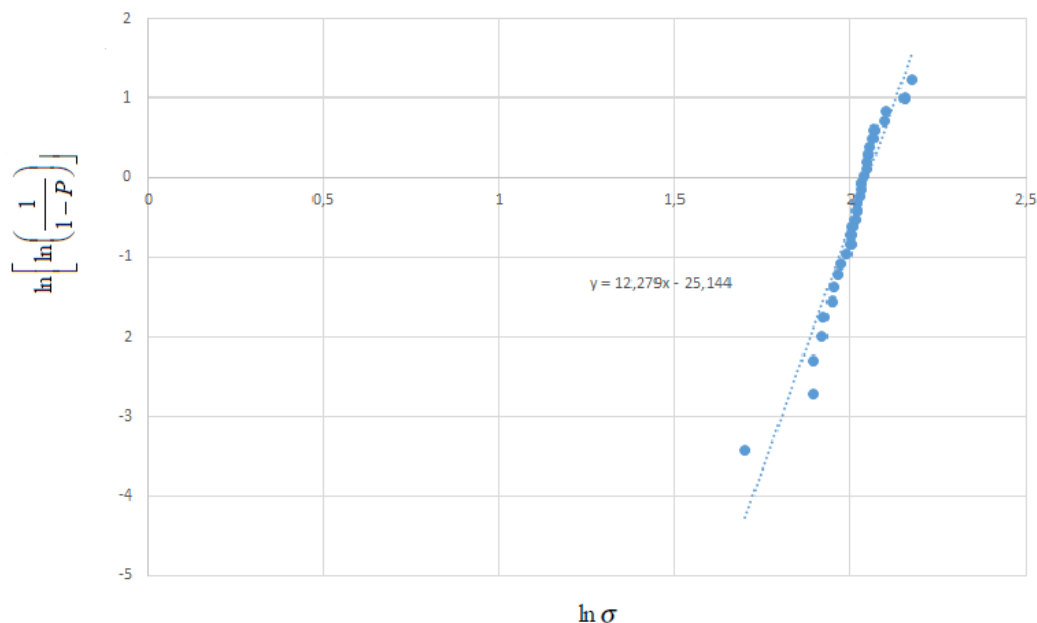
$$P_i = \frac{1}{N+1} \quad (6)$$

A Figura 15 ilustra um gráfico arbitrário de $\ln[\ln(\frac{1}{1-P_i})]$ em relação a $m \ln \sigma - m \ln \sigma_0$. Com base no gráfico, foram calculados os parâmetros de interesse nesse trabalho. O módulo de Weibull foi determinado como equivalente ao coeficiente angular da reta e a resistência característica (σ_0) foi dada pela Equação (7), onde b é coeficiente linear da reta:

$$\sigma_0 = e^{(b/m)} \quad (7)$$

A importância de se saber o módulo de Weibull é que esse parâmetro mostra se o processamento foi bem controlado e se o material tem propriedades homogêneas. Sendo assim, maiores inclinações da reta, ou ainda, maiores valores de módulo de Weibull, mostram que a dispersão de resultados é baixa e o processamento foi bem controlado.

Figura 15: Exemplo arbitrário de curva $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)\right]$ em função de $\ln \sigma$.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.4.8 Caracterização dos Corpos de Prova de flexão por testes de Arquimedes

Os fragmentos após o ensaio de flexão realizado de cada composição e idade, foram caracterizados em relação à densidade aparente e porosidade, seguindo a norma ASTM C20 - 00. Para isso, foram separados 12 fragmentos de corpos de prova do ensaio de flexão de cada sistema, que foram colocados em béqueres separados de acordo com cada composição. Em seguida, cada béquer foi preenchido com querosene até ultrapassar o nível dos corpos de prova, como mostra a Figura 16 (a) e (b). Foi feita então uma adaptação da norma que recomenda a utilização de água para os testes, utilizou-se querosene, pois o cimento e a escória reagem com a água.

Os materiais foram secos em estufa, por aproximadamente 110°C da noite para o dia, para se obter a massa seca, e então permaneceram imersos em querosene por 24 horas. Passado esse tempo, foram pesados em balança hidrostática, ilustrada na Figura 17, anotando-se sua massa imersa. Posteriormente retirando-se o excesso de querosene com o auxílio de papel absorvente se determina a massa úmida.

Com os dados de massa seca, massa úmida e massa imersa obtidos, foi possível calcular os parâmetros representados pela Equação (8), pela Equação (9) e pela Equação (10):

• **Volume aparente da parte sólida:**

$$V_{as} = (M_s - M_i) / D \quad (8)$$

Onde M_s é a massa seca, M_i é a massa imersa e D a densidade do querosene ($0,76 \text{ g/cm}^3$ à 20°C)

• **Densidade aparente:**

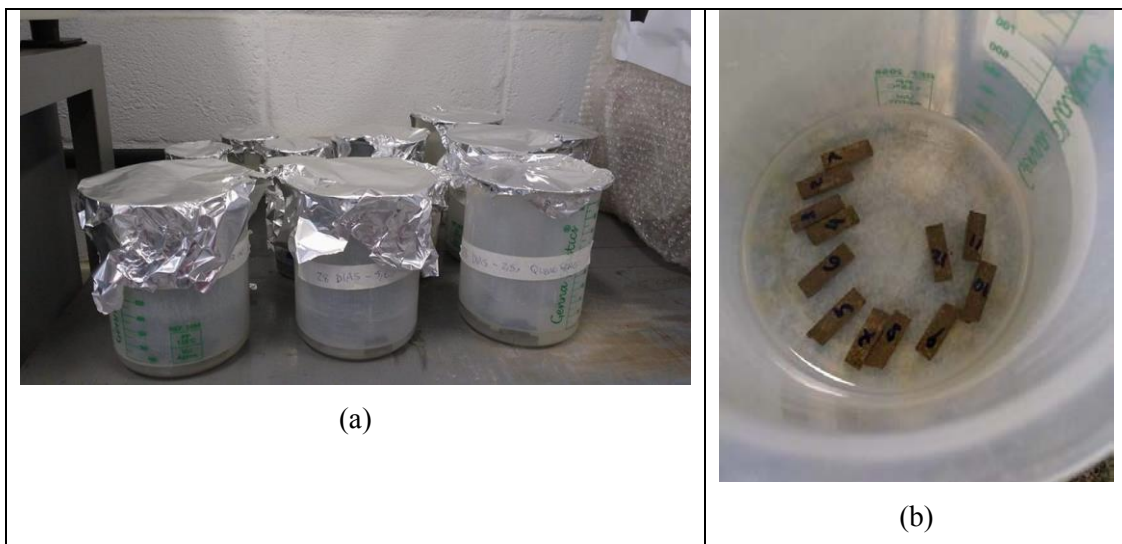
$$D_a = M_s / V_a \quad (9)$$

• **Porosidade aparente:**

$$P_a = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \right) \times 100\% \quad (10)$$

Onde M_u é a massa úmida

Figura 16: (a) e (b) Corpos de prova imersos em querosene



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 17: Balança hidrostática utilizada para a medição da massa imersa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.4.9 Teste de absorção de umidade

Os testes de absorção de umidade foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 13555. Por meio desses testes foi possível caracterizar as composições frente à ação da água, obtendo dados não somente de absorção, mas também avaliando o comportamento desses materiais em contato com a água, verificando se os materiais mantiveram-se íntegros ou se desagregaram na água.

Utilizou-se para esse teste 5 fragmentos de corpos de prova, pós ensaio de flexão em três pontos, de cada composição e idade. Após passarem pelo processo de secagem es estufa por aproximadamente 110°C do dia para a noite, estes foram imersos em béqueres com água destilada, onde permaneceram por 24h. Após esse período foram retirados da água e o excesso de água foi tirado com o auxílio de papel absorvente. A quantidade percentual de água absorvida em relação à massa do CDP é dada pela Equação (11), onde m_2 é a massa do CDP saturado e m_1 a massa do CDP seco em estufa:

$$A = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100\% \quad (11)$$

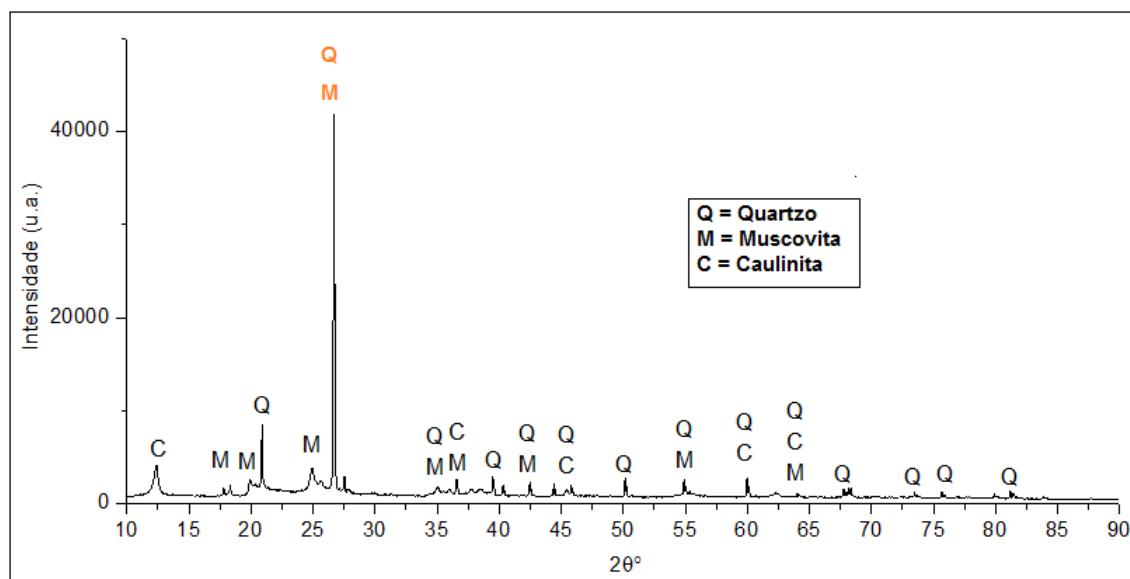
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

4.1.1 Argila

A Figura 18 ilustra o difratograma de raios X obtido da argila utilizada neste trabalho. Foram ilustrados apenas os principais picos, pois a quantidade de picos encontrados é grande. Seus principais constituintes são o quartzo (Q), a muscovita (M) e a caulinita (C). Tanto o quartzo quanto os silicatos (muscovita e caulinita) foram citados como constituintes de argilas na revisão bibliográfica, estando esse resultado coerente com o que foi observado. O resultado também está de acordo com o encontrado por Ranieri (2007), quem analisou dois tipos de argila de pontos diferentes da cidade de Cunha, ambas apresentando os mesmos constituintes, como foi apresentado nas Figuras 1(a) e 1(b). No caso da argila desse trabalho, porém, não foram encontrados picos de gibbsita, mas a grande semelhança entre essa argila e as estudadas por Ranieri mostra uma formação mineralógica muito semelhante.

Figura 18: Difratograma de raios X da análise feita na argila utilizada nesse trabalho.



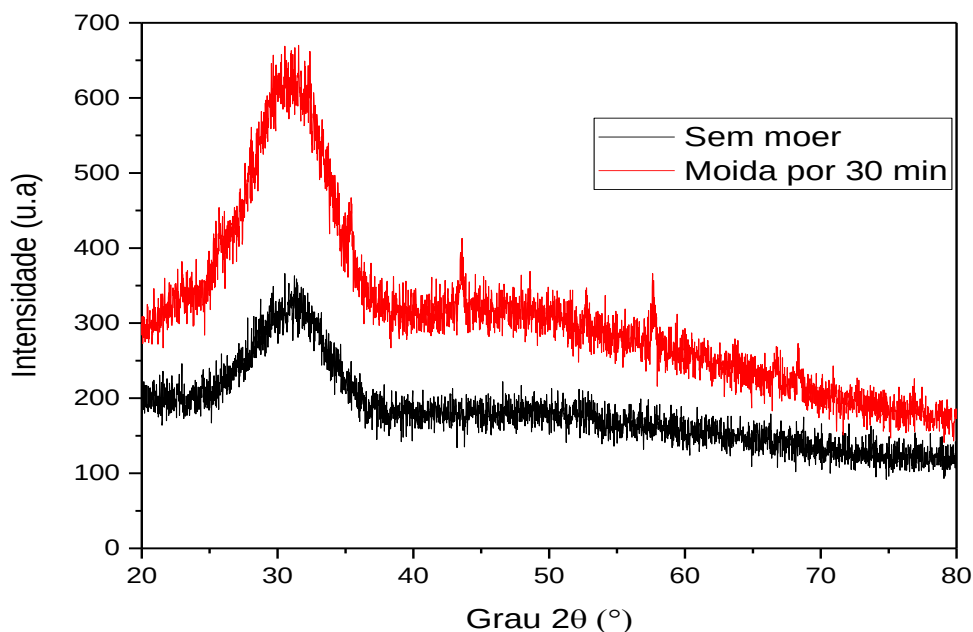
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.2 Escória de alto forno

A Figura 19 ilustra o difratograma de raios X da escória de alto forno sem moer e moída por 30 minutos. Nota-se que sem moer não se identifica tanto os picos. Já a moída os picos são mais identificados.

Por ser um material muito amorfo, para a escória de alto forno, não teve como se obter de fato cada pico na análise. Então foi visto que os maiores picos eram de CaO. Não foi possível quantificá-lo através do programa utilizado. Na análise foi visto um pico pequeno de sílica comparado ao de CaO, portanto optou-se por não adicionar a cal para auxiliar na produção do C-S-H, pois o próprio CaO contido na escória junto com a adição da água já garantia a formação da reação.

Figura 19 – Comparação das difratometrias de raios X da escória de alto forno sem moer e moída por 30 minutos



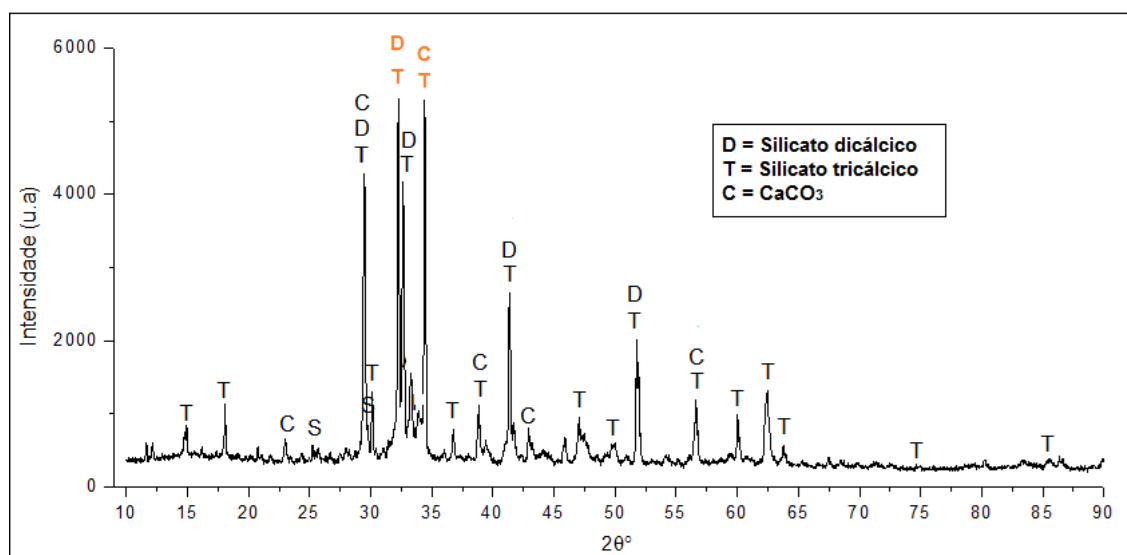
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.3 Cimento

A Figura 20 ilustra o difratograma de raios X do cimento utilizado no trabalho e suas respectivas fases. Através do software SearchMatch notou-se uma grande quantidade de picos, sendo ilustrados apenas os principais. Essas fases condizem com a composição do cimento CP-V.

Foi possível encontrar os constituintes de maior interesse, que são os seus constituintes principais: o C_2S (D = silicato dicálcico) e o C_3S (T = silicato tricálcico). Também foram identificados picos de carbonato de cálcio ($C = CaCO_3$), que podem estar relacionados à adição desse material para promover um efeito *filler*.

Figura 20: Difratograma do cimento utilizado e fases presentes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG DA ARGILA

A Tabela 6 mostra os dados granulométricos obtidos através do peneiramento da argila utilizada neste trabalho. Seguido do peneiramento, as frações mais finas da argila foram analisadas pelo método de sedimentação, obtendo-se o perfil granulométrico ilustrado na Figura 21. Com o auxílio da Tabela 6 e da Tabela 7, é possível observar que o solo utilizado nesse trabalho é argiloso, pois o material passa quase que em sua totalidade pelas peneiras de maiores aberturas, evidenciando um material muito fino.

Para a classificação de um solo utilizado em tijolos, se faz necessário também, os dados de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade (Limites de Atterberg) desse solo.

Com o auxílio da norma ABNT 10833 para solos utilizados em tijolos, têm-se as referências de valores para os Limites de Atterberg e para a granulometria do solo. Esses valores estão listados na Tabela 8, juntamente com os valores estimados para o solo utilizado nesse trabalho. Nota-se que a quantidade de material que passa na peneira de abertura de 75 μ m é maior que a estipulada pela norma (de 10% a 50%), o que sugere que o material é bem fino, como também foi observado na análise granulométrica. Esse comportamento não é desejado em solos para uso em tijolos, uma vez que um solo bem graduado é mais indicado, pois confere melhores propriedades mecânicas para o tijolo.

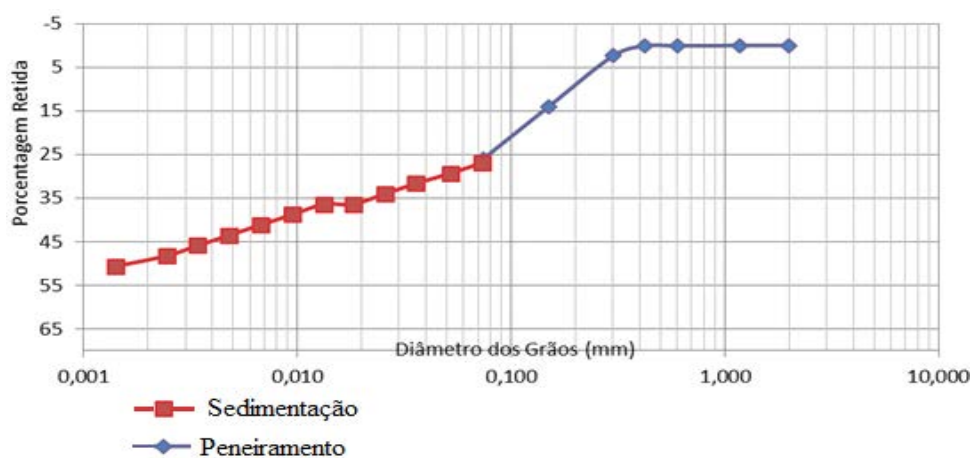
Portanto, tendo em vista o valor do Limite de Plasticidade, nota-se que esse está 2% acima do recomendado pela norma, sendo uma diferença muito baixa. O Limite de Liquidez, por sua vez, está dentro do limite recomendado pela norma.

Tabela 6: Perfil granulométrico da argila de Cunha de acordo com a análise de granulometria por peneiramento.

Peneira nº	Abertura (mm)	Material Retido			% Passa da Am. Total	% Retida da Am. Total
		Massa (g)	% Am. Parcial	% Acumulada		
10	2,0	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
16	1,18	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
30	0,6	0,04	0,20	0,20	99,94	0,06
40	0,425	0,01	0,05	0,26	99,93	0,07
50	0,3	1,61	8,24	8,49	97,60	2,40
100	0,15	8,03	41,07	49,57	85,97	14,03
200	0,074	8,28	42,35	91,92	73,97	26,03
Prato	-	1,58	8,08	100,00	-	-
TOTAL		19,55	100,00	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21: Perfil granulométrico da argila de Cunha de acordo com a análise de granulometria por sedimentação e peneiramento (NBR 7181).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 7: 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)	$\leq 45\%$	29%
Limite de Plasticidade (LP)	$\leq 18\%$	20%
Quantidade de material que passa pela peneira de abertura 4,75mm	100%	100%
Quantidade de material que passa pela peneira de abertura 75 μ m	10% - 50%	73,97%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De acordo com a norma ASTM D3282, a análise granulométrica e as medidas dos Limites de Atterberg também são importantes para a classificação do solo descrita na Tabela 8, onde se comprova que o solo utilizado nesse trabalho é mesmo um solo argiloso, classificado como A6. O solo em questão, pode ser classificado como argiloso, que pode ser uma característica intrínseca do mesmo, ou pode também ter sofrido moagem com o processo de desaglomeração no moinho de bolas. Neste trabalho pretende-se avaliar se a argila de Cunha pode ser usada nessas condições granulométricas com uma quantidade de 10% de cimento no máximo para o desenvolvimento de um tijolo ecológico.

Tabela 8: Classificação dos solos de acordo com a ASTM D3282.

Classificação geral	35% de material ou menos passando na peneira de número 200 (75µm)			Mais de 35% de material passando na peneira de número 200 (75µm)			
Classificação por grupo	A-1	A-3	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
% Passante							
Nº10 (2,00mm)	-	-	-	-	-	-	-
Nº40 (425µm)	50 máx.	51mín.	-	-	-	-	-
Nº200 (75µm)	25máx.	10máx.	35máx	36mín.	36mín.	36mín.	36mín.
Limites de Atterberg do material que passa na peneira Nº40 (425µm)							
Limite de Liquidez (LL)	-	-	-	40máx	41mín	40máx	41mín
Limite de Plasticidade (LP)	6máx	-	-	10máx	10máx	11mín.	11mín.
Características	Areia ou pedregulho	Areia fina	Silte	Solos siltosos		Argilas	

Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials (2015).

4.3 DENSIDADE DAS MATÉRIAS-PRIMAS POR PICNOMETRIA LÍQUIDA

Esses testes foram feitos para se obter os cálculos das matérias primas de cada composição para a fabricação dos tijolos solo-cimento.

Os resultados de densidade encontrados por picnometria líquida são listados na Tabela 9.

Para avaliar o resultado de densidade da argila, foi tomado como referência o valor de densidade encontrado para argila caulinítica da cidade de Guaratinguetá utilizada por Neto et. al. (2003) os quais encontram um valor equivalente a $2,81 \text{ g/cm}^3$ e que possui composição semelhante à argila caulinítica utilizada nesse trabalho. Porém, precisa-se levar em conta que apesar da composição das argilas serem semelhantes, ainda há uma diferença em seus constituintes. Na Figura 22 são ilustrados os picnômetros utilizados durante o processo.

Figura 22 – Picnômetros utilizados



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A densidade da escória de alto forno utilizada neste trabalho tem um valor estimado de $2,66 \text{ g/cm}^3$, e está de acordo com a citada na literatura de $2,7 \text{ g/cm}^3$ (SALLES & MIZUMOTO, 2012)

No caso do cimento, o valor de densidade estimado em $2,90 \text{ g/cm}^3$ está na faixa de valores mencionada para cimentos do tipo CP-V, entre $2,82 \text{ g/cm}^3$ e $3,12 \text{ g/cm}^3$ (SANTOS A., 2016).

Tabela 9: Resultados de densidade obtidos por picnometria líquida.

Material	Densidade Média (g/cm³)	Desvio Padrão (g/cm³)
Argila	2,43	0,06
Escória de Alto Forno	2,66	0,02
Cimento	2,90	0,02

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO

A Figura 23 mostra as condições em que o corpo de prova foi ensaiado para flexão em 3 pontos.

Figura 23: Corpo de prova sendo ensaiado



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Figura 24 ilustra os resultados dos ensaios de flexão para os corpos de prova nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias em todas suas variações de composição. Esse gráfico traz diversas informações acerca do comportamento desses materiais.

Inicialmente nota-se uma redução na resistência característica (semelhante à resistência média do material) à medida que se reduz o teor do cimento. Portanto, se reduz a resistência à medida que se aumenta o teor de escória de alto forno.

Fazendo uma comparação das composições CE0,0 (sem escória) e CE10,0 (sem cimento), nota-se que o cimento contribui mais para o desenvolvimento de resistência mecânica do que a escória. Isso acontece porque o cimento é mais reativo e sua cinética

de reação é maior, o que explica a queda nos níveis de resistência ao diminuir os teores de cimento.

A idade com maior resistência foi a de 28 dias: 10,80MPa para CE0,0; 8,9MPa para CE2,5; 7,0MPa para CE5,0 e 4,4MPa para CE10,0.

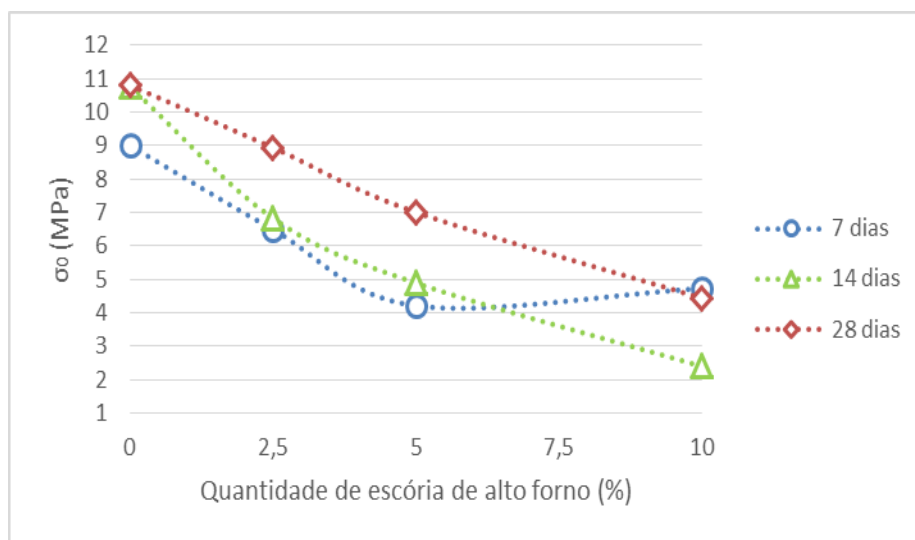
O aumento do tempo tem relação notória com o aumento da resistência mecânica para uma mesma composição.

O cimento Portland possui um aumento na resistência de acordo com o aumento da idade (Neville, 1997).

Para cada composição de cimento, os níveis maiores de C_3S e C_2S , principais componentes do cimento do tipo CP-V, são apresentados nas idades mais avançadas, sendo provavelmente os principais responsáveis pelo ganho de resistência mecânica nos materiais utilizados nesse trabalho.

As variações de resistência encontradas não sendo em função do explicado pela revisão bibliográfica, resulta de um processo de fabricação variável.

Figura 24: Ensaio de flexão para os corpos de prova nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias em todas suas variações de composição.



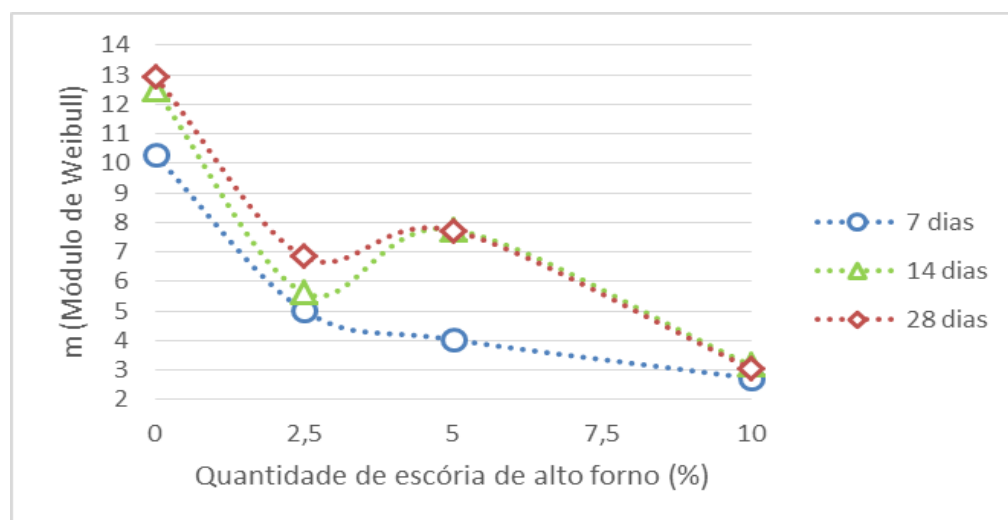
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Toma-se como uma base de comparação os requisitos da norma ABNT NBR 8491, pois não há uma norma que fala da resistência dos tijolos em ensaio de flexão. A norma diz que são 2,0 MPa para valor médio e 1,7 MPa para valor individual em

compressão. Portanto, todos os materiais utilizados nesse trabalho apresentaram valores acima dos requisitados por essa norma. É esperado para o ensaio de compressão que os materiais acabem por atender essa norma, visto que o ensaio de flexão é um ensaio mais crítico. Além disso, os corpos de flexão são muito delgados e ainda assim atingiram bons níveis de resistência mecânica.

A Figura 25 ilustra os valores de módulo de Weibull (m) calculados por meio da análise estatística dos valores obtidos pelo ensaio de flexão, como visto na revisão bibliográfica. Segundo Quercia (2016), o parâmetro módulo de Weibull (m) está relacionado com a distribuição de falhas encontradas no material. Sendo assim, valores mais elevados de m significam que os valores de resistência do material em questão estão muito agrupados e próximos aos outros. Por outro lado, valores menores de m tem o significado de que os valores de resistência do material estão mais dispersos (QUERCIA, 2016).

Figura 25: Módulo de Weibull (m) obtidos por tratamento estatístico dos dados adquiridos por meio de ensaios de flexão



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Portanto, os resultados obtidos para o módulo de Weibull através do gráfico, mostram uma não linearidade no comportamento da curva para todas as idades.

Pode-se concluir então que, os materiais de cada composição estudada possui falhas internas de graus diferenciados, resultando numa dispersão dos resultados de

resistência. Isso devido a uma notória variabilidade no processo de preparação dos corpos de prova.

Através do gráfico, nota-se que para a idade de 14 e 28 dias houve uma tendência de aumento do módulo de Weibull em função do aumento do teor de escória de alto forno até 5,0%, enquanto para a idade de 7 dias houve uma queda desses valores em função do mesmo parâmetro. Também é possível observar que os maiores valores de m foram encontrados para as composições com 28 dias de idade, o que indica uma relação a idade com m . Isso pode ser explicado devido aos compostos cimentares terem a tendência a fechar defeitos no material de acordo com o tempo, o que faz aumentar a homogeneidade do material e diminuir a dispersão de resultados.

4.6 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE UMIDADE

Antes de serem ensaiados, os corpos de prova foram colocados em estufa à 110° por 24 h. A Figura 26 mostra como foram dispostos os mesmos para secagem.

Foram utilizados 17 corpos de prova para cada composição, 5 para o ensaio de absorção de umidade e 12 para o ensaio de Arquimedes.

Figura 26: Corpos de prova retirados da estufa



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A Figura 27 ilustra os resultados de absorção de umidade após 24 h de imersão em água à temperatura ambiente.

A absorção de água se diz que quando em contato com líquidos, a estrutura tende a absorvê-los devido a forças de capilaridade. A absorção de água é definida como o ganho percentual de massa que tem a amostra, quando absorve o máximo de água. (RICHERSON, 1992).

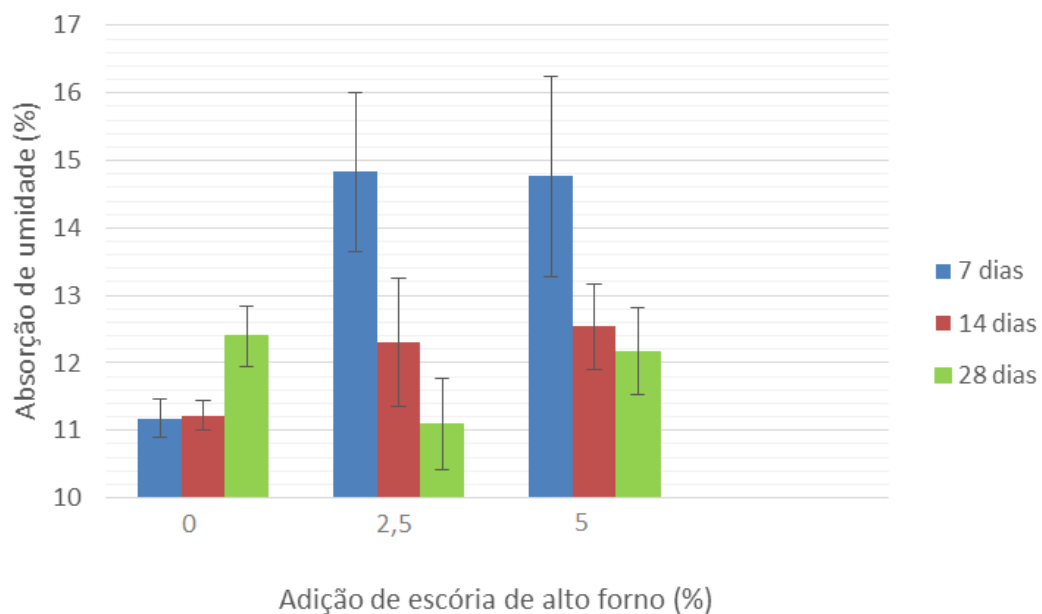
Observa-se que os corpos de prova com 7 dias em cura, para as porcentagens de 2,5% e 5,0% de escória, foram os que mais absorveram umidade. Os de 28 dias em cura, absorveram uma menor porcentagem de umidade.

Mesmo com esses resultados observados, todos os valores ainda estão abaixo do máximo permitido pela norma ABNT NBR 8491. A mesma estipula o valor médio de absorção de água para tijolos não estruturais deve ser de no máximo 20%, sendo o maior valor observado equivalente a 14,82%.

Esse ensaio foi de grande importância para observar o comportamento dos corpos de prova perante a ação da água. Embora todos os corpos de prova tenham atingido níveis de absorção permitido por norma, os corpos de prova da composição com 10.0% de escória substituída, apresentaram um mau comportamento em relação a água, pois houve grande absorção de umidade. Não foi possível medir sua massa úmida, pois ao pegá-los com a pinça estavam esfarelando, como mostra a Figura 28.

Nota-se, também na Figura 27 que, para o corpo de prova padrão (com 0% de escória de alto forno) tem-se uma absorção de umidade maior que com a adição de 2,5% de escória há 28 dias. Resultado ótimo garantindo uma porosidade menor no corpo de prova com substituição de 2,5% de escória de alto forno com 28 dias de cura.

Figura 27: Absorção de umidade após 24 horas de imersão em água à temperatura ambiente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 28 : Corpos de prova com substituição total do cimento por escória de alto forno

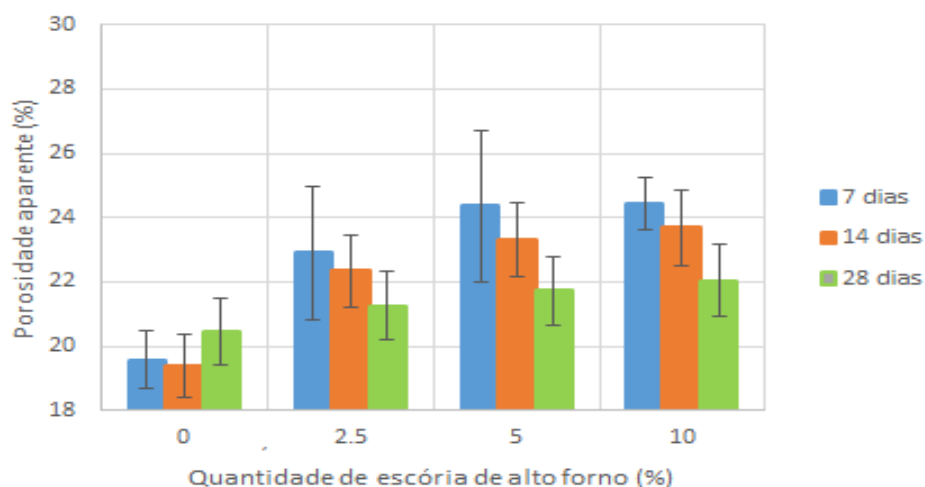


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.7 CARACTERIZAÇÃO POR ENSAIO DE ARQUIMEDES

A Figura 29 ilustra os resultados de porosidade obtidos após 24 horas de imersão em querosene à temperatura ambiente.

Figura 29: Porosidade obtidos após 24 horas de imersão em querosene à temperatura ambiente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Figura 29 observa-se que a porosidade aumenta com a adição de escória de alto forno. Portanto, pode-se relacionar o mesmo com o observado nos testes de absorção de água que, quando maior o teor de escória de alto forno adicionado no lugar do cimento, maior será a porosidade aparente do material, mais água o mesmo absorve. Os valores de 5,0% e 10,0% estão próximos em relação à porosidade, mas os de 10,0% reagiram mais rapidamente com a água devido à composição da escória, fazendo com que os corpos de prova se esfarelassem ao serem pegos com a pinça para medição.

Observa-se também que para uma mesma composição, a porosidade diminuiu conforme houve um avanço na idade de cura. Portanto, os tijolos mais resistentes foram aqueles com maior idade de cura, pois quanto maior a porosidade aparente menos resistentes são, visto que poros atuam como concentradores de tensões.

Os valores de porosidade aparente para os corpos de prova com idade de 7 dias são maiores com qualquer teor de escória adicionada, portanto são menos resistentes, devido à reação dos componentes para gerar a resistência ser uma reação lenta.

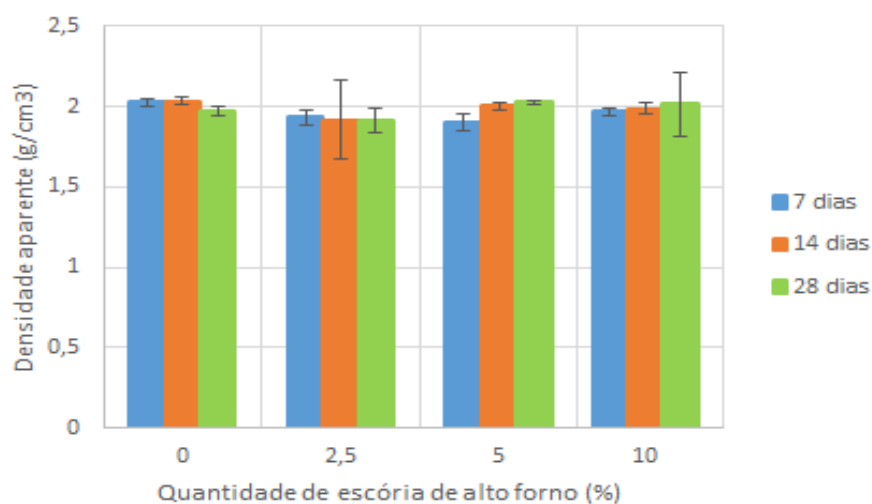
O método de fabricação de materiais cerâmicos (sinterização) caracteriza-se por produzir estruturas contendo poros. Estes poros desempenham papel importante. Em algumas ocasiões, os poros são desejáveis. Por exemplo, poros devem existir em azulejos para promover sua fixação às paredes através do cimento. Em outras, os poros

promovem apenas a queda da resistência mecânica, como no caso deste trabalho. (RICHERSON, 1992)

Por fim também é possível relacionar os valores de porosidade aparente com os valores de densidade aparente, apresentados na Figura 30.

A relação de ambas figuras faz sentido, pois se um material tem uma maior porosidade ele terá por consequência uma menor densidade.

Figura 30: Representação dos valores médios de densidade aparente dos materiais analisados pelo método de Arquimedes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5 CONCLUSÕES

Após a realização deste trabalho, caracterizando os corpos de prova e fazendo a revisão bibliográfica, foi possível concluir que:

- A escória de alto forno produz propriedades as quais garantem uma certa resistência ao material e, atualmente, é um rejeito muito utilizado para diversas finalidades, sendo a principal, para a fabricação de cimentos.

- A moagem da escória deixou as partículas mais reativas como visto na revisão bibliográfica, podendo assim ocorrer a reação para a formação de C-S-H, ocasionando a resistência necessária ao material.

- O estudo da composição dos corpos de prova se mostrou adequada, uma vez que os corpos de prova produzidos com até 5,0% de cimento e 5,0% de escória de alto forno obtiveram resultados acima do exigido pela norma ABNT NBR 8491, que trata-se da resistência mecânica dos materiais, e valores de absorção de água abaixo do limite exigido pela mesma norma. Através dos ensaios de flexão, os resultados mostraram que para todas as composições, menos a de 10,0%, em todas as idades, possuem valores de resistência característica adequados, sendo equivalentes a 10,81 MPa, 8,94 MPa, 7,00 MPa, 4,44 MPa, para as composições de CE0,0%, CE2,5%, CE5,0% e CE10,0% respectivamente, sendo esses dados aos 28 dias de idade, onde obtiveram os maiores valores.

- Através do módulo de Weibull (m), os valores estimados de m não foram tão elevados como o esperado, indicando um processamento dos corpos de prova de forma não muito controlada e bem variável. O mesmo mostrou ter relação com a idade do material, sendo maiores para as composições com 28 dias de idade devido a que as reações de hidratação vão se completando possivelmente eliminando defeitos nos corpos de prova, visto também na revisão bibliográfica.

- Com a análise de absorção de água após 24 h em imersão, foi visto que quanto maior o teor de escória de alto forno substituído, mais água o material tende a absorver. Foi visto que para 10,0% de substituição o corpo de prova acabou esfarelando em contato com a pinça antes da medição. Com exceção deste, todos os outros valores estão abaixo do máximo permitido pela ABNT NBR 8491.

- Por intermédio do método de Arquimedes foi verificado o aumento da porosidade aparente juntamente com o aumento do teor de escória de alto forno. Todos esses valores puderam ser relacionados com a resistência, a absorção de umidade e a densidade aparente do material. Por fim, pode-se concluir que quanto maior a porosidade aparente do material, maior será a sua absorção de umidade e, por consequência, menor será a sua resistência mecânica e a sua densidade aparente. Então, a composição com 5,0% de escória de alto forno se mostrou a mais adequada, substituindo 5,0% de cimento em comparação com a composição de referência. Isso porque, apesar da composição com 10,0% de escória não ter sido satisfatória e não ser um material seguro para a aplicação em tijolos, um aumento da sua composição ajuda na formação da reação garantindo a resistência adequada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Analisar a atividade pozolânica da escória de alto forno e fazer análise para a detecção de C-S-H formada a partir da reação e quantificá-la;
- Fazer análise granulométrica da escória de alto forno e do cimento, que pode mostrar mais informações acerca do comportamento das amostras;
- Realizar a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas amostras, para analisar microestrutura dos corpos de prova e a interação entre as matérias primas às diferentes idades;
- Realizar os mesmos estudos com solo arenoso ao invés de solo argiloso como o proposto neste trabalho para avaliar se há melhores resultados;
- Realizar o estudo da escória de alto forno com a adição de cal, para certificar se irá ocorrer um aumento de resistência no material;
- Realizar o estudo com tijolos em formato comercial ao invés de corpos de prova na forma de barras como proposto neste trabalho, visando a viabilidade do processo para tijolos comerciais.

REFERÊNCIAS

- ACCHAR, W.; RULFF, B.; SEDAGADAES, A. Effect of the incorporation of a spent catalyst reject from the petroleum industry in clay products. **Applied Clay Science**, v. 42, p. 657 – 660, 2009
- AHMARI, S., Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. **Construction and Build Materials**. v. 29. p. 323-331. 2015
- AÏTCIN, P. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. **Cement na Concrete Research**. Canadá, 2000.
- ALBUQUERQUE, L. Q. C., et. al. Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com montículos do cupim *Cornitermes cumulans*. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 32, n. 2, p. 553-560, 2008.
- ALMEIDA, G. C. P., **Caracterização física e classificação dos solos**, 2005. Dissertação (Mestrado em) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2005. Disponível em: <http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32576506/APOSTILA_SOLOS.pdf> . Acesso em: 9 nov 2016
- ANICER - Associação Nacional da Indústria de Cerâmica. **O que é cerâmica**. Disponível em: <http://anicer.com.br/index.asp?pg=institucional_direita.asp&secao=6&ex=2>. Acesso em: 28 mai. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos-solo cimento com a utilização de prensas manuais**. Publicações ABCP. São Paulo. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- BARROS, F. S. **Efeito da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz e cal nas propriedades de tijolos ecológicos**. 2016. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- BARROS, H. C., **Fabricação de tijolos prensados com agregados reciclados de telhas cerâmicas, cimento Portland e cinza de casca de arroz**. 2012. 122f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso. UFMT, Cuiabá. 2012.

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

CARTER, C. B.; NORTON M. G., *Ceramic materials: science and engineering*. **Springer Science & Business Media**, 2013.

CHAVES, L. F. M., **Estudo da adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

CSN – **Companhia Siderúrgica Nacional**. Disponível em: <<http://www.csn.com.br/>>. Acesso em: 10 nov 2016

COSTA D. S., MOREIRA A. C. M., **Estudo do aproveitamento da escória de alto Forno das siderúrgicas de Marabá – PA** para fabricação de material, 2013.

:ECIVIL. Artigos Engenharia Civil: **Tabelas composição do cimento Portland**. Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland_composicao.htm>. Acesso em: 8 nov 2016.

EHRENBERG, A.; GEISLER, J **Carbon dioxide emissions with cement production**. In: *Iron and steel slags – properties and utilization*. Duisburg: 2000. Pl. 281 – 292. Artigo apresentado no International Symposium on the Utilization of Metallurgical Slag – ISUS’99, 1999, Beijing, China.

FEBRABAN. **17º Café com sustentabilidade**. 2010. Disponível em: <http://www.febraban.org.br/>. Acesso em: 10/11/2015.

FERRAZ, A. L. N. **Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento**. Ilha Solteira: UNESP, 2004. 107p. Dissertação Mestrado.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa**. São Carlos: EESC-USP, 2003. 165p. Dissertação Mestrado.

FERREIRA, D.W., **Comparação do tijolo comum e sem queima pela análise do ciclo de vida**. 2015. 59f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia dos Materiais). Universidade Estadual Paulista, São Paulo. UNESP, Guaratinguetá. 2015.

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

JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo : EP USP, 1995 (Tese de Doutorado)

MIELI, P. H. **Avaliação do tijolo modular de solo-cimento com material na construção civil**. 2009. 59f. Dissertação (Conclusão de curso – Engenharia de Materiais). – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. UFRJ, Rio de Janeiro. 2009.

MIZUMOTO, C.; SALLES, F. M. **Effects of granulated blast furnace slag in different fineness in mortar composition**. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto, Out. 2012.

MURPHY, J. N.; MAADOWCROFT, T. R. e BARR, P. V. **Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag**. Canadian Metallurgical Quarterly, 1997, v.36, n.5, p. 315 – 331.

NASCIMENTO R. M., **Estudo da aditivação do metacaulim de alta reatividade produzido por meio do método de calcinação flash em cimento Portland**. Universidade Federal do Paraná, 2009.

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

NETO, D. H., et. al. Otimização dos parâmetros de prensagem uniaxial para argilas obtidas na região de Guaratinguetá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 47., 2013. João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2013.

OLIVIERA, T. Y. M. **Estudo sobre o uso de materiais de construção alternativos que otimizam a sustentabilidade em edificações**. Rio de Janeiro, 2015

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

PINTO, A. R. **Desenvolvimento de tijolos cerâmicos com a escória de alto-forno**. 2011. 28f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual Paulista, São Paulo. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2011.

PINTO, C. D. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

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

QUERCIA, G. et. al. **Weibull statistics applied to tensile testing for oil well cement compositions**. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol>> Acesso em: 08 set. 2016.

RANIERI, M. G. A. **Caracterização tecnológica das argilas da cidade de cunha para fins de cerâmica artística**. 2010, 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

RICHERSON D. W. **Modern ceramic engineering, properties, processing and use in design**. 2.ed. Editora Marcel Dekker. 1992.

SANTOS. A. **Peso, massa ou densidade?** Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/peso-massa-ou-densidade/>. Acesso em: 06/07/2016.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. Volume 2. 2ª edição. São Paulo-SP: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1989.

SHI, C.; QIAN, J. **High performance cemeting materials forma industrial slags – a review**. Resources, Conservation & Recycling 29, 2000, p. 195 – 207.

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

SNIC – **Sindicato nacional da indústria do cimento**: Relatório Anual 2007. Disponível em: http://www.snic.org.br/25set1024/relat_2007-8.html, acessado em 12/11/2011.

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

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

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. 2.ed. Portugal. TecMinho. 2010.

WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide alicability. **ASME Journal of Applied Mechanics**, p. 293-297. Sep. 1951.