

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LUIZA PERRONI FAGUNDES

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA PROVENIENTE DE OLARIAS PARA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO**

Ilha Solteira
2019

LUIZA PERRONI FAGUNDES

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA PROVENIENTE DE
OLARIAS PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO.**

Dissertação de Mestrado Acadêmico
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil – Área de concentração:
Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima
Orientador

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F156u Fagundes, Luiza Perroni.
Utilização de resíduo de cerâmica proveniente de olarias para estabilização de solo Laterítico / Luiza Perroni Fagundes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
71 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2019

Orientador: Mauro Mitsuuchi Tashima
Inclui bibliografia

1. Materiais pozolânicos. 2. Estabilização química. 3. Solos sensitivos.
4. Sustentabilidade.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Utilização de resíduo de cerâmica proveniente de olarias para estabilização de solo laterítico

AUTORA: LUIZA PERRONI FAGUNDES

ORIENTADOR: MAURO MITSUUCHI TASHIMA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. EVERTON JOSÉ DA SILVA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Eunápolis / Instituto Federal da Bahia

Ilha Solteira, 22 de janeiro de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz e Fernanda, por tudo que me proporcionaram, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a crescer profissionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre presente em todo local e hora e tornar tudo isso possível.

Agradeço aos meus pais Luiz Antônio e Fernanda, os grandes responsáveis por isso, que me educaram com muito amor e não mediram esforços para me fazer chegar até aqui.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares pela ajuda, pela companhia e pela motivação com que tem me presenteado.

Agradeço ao Alcenir e Yasmin pela colaboração com a pesquisa.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Mauro M. Tashima e ao Prof. Dr. José Augusto de Lollo que sempre me auxiliaram academicamente, e compartilharam seu conhecimento sempre que necessário.

Agradeço ao grupo Materiais Alternativos de Construção (MAC) pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço ao Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón – ICITECH e ao Departamento de Física e Química – DFQ pelos suportes nos ensaios de laboratório.

Agradeço aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, Flávio, Gilson e especialmente ao Mário, pela colaboração para o bom andamento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 1648136.

RESUMO

O modo como são dispostos os resíduos gerados pela indústria, pela agropecuária e pela sociedade gera uma preocupação crescente. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com a finalidade de diminuir o impacto que estes causam a sociedade e ao meio ambiente. Diversos resíduos têm sido estudados como materiais cimentícios suplementares para substituição de parte da quantidade de cimento, contribuindo para a redução de áreas de aterro e também na diminuição da emissão de CO₂ associada à produção de cimento Portland, que é responsável por cerca de 5% a 8% da emissão global de CO₂. Um destes resíduos industriais é a cerâmica vermelha, proveniente do descarte de olarias. O objetivo geral dessa pesquisa é estudar a aplicação de resíduo cerâmico proveniente de olarias em misturas de solo-cimento para estabilização de um solo laterítico, avaliando a resistência à compressão, o efeito de expansão e contração, o potencial hidrogeniônico, a condutividade elétrica, a microestrutura e a proporção ideal de mistura (solo + resíduo cerâmico + cimento Portland). Os resultados mostram ganho de resistência e menor contração/expansão para as misturas com cimento, em relação ao solo puro. E que mesmo com a substituição de parte do cimento por resíduo cerâmico, a resistência praticamente não se altera, devido a reação pozolânica existente entre a cerâmica e o hidróxido de cálcio, o que é confirmado nos ensaios de pH e condutividade elétrica e por imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Palavras-chave: Materiais pozolânicos. Estabilização química. Solos sensitivos. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The waste generated by industry, agriculture and society is a growing concern. Much research has been carried out to reduce the impact on society and the environment. Several residues have been studied as supplementary cementitious materials to replace part of the amount of cement, contributing to the reduction of landfill areas and also to the reduction of CO₂ emissions associated with the production of Portland cement, which accounts for about 5% of 8% of global CO₂ emissions. One of these industrial wastes is red ceramics from the disposal of potteries. The general objective of this research is to study the application of different percentages of the mixture of ceramic residue with Portland cement in the stabilization of a lateritic soil, evaluating the compressive strength, expansion and contraction effect, permeability, hydrogenation potential, electrical conductivity, the microstructure and the ideal mixing ratio (soil + ceramic residue + Portland cement). The results show increased strength and lower contraction / expansion for cement additions, relative to pure soil. And even with the replacement of part of the cement by ceramic waste, the strength is practically unchanged due to the pozzolanic reaction between the ceramic and the calcium hydroxide, which is confirmed in the pH and electrical conductivity tests and the images of scanning electron microscopy.

Key-words: Pozzolanic materials. Chemical stabilization. Sensitive soils. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Economia circular aplicada na engenharia civil | 13 |
| Figura 2 – Danos causados à edificações após a ascensão do lençol freático | 19 |
| Figura 3 – Presença de solos colapsíveis no Brasil | 19 |
| Figura 4 – Fluxograma do processo de produção da cerâmica vermelha | 26 |
| Figura 5 – Exemplos de resíduos gerados pelo segmento da cerâmica vermelha | 27 |
| Figura 6 – Composição dos resíduos..... | 28 |
| Figura 7 – Localização do solo utilizado nos ensaios | 31 |
| Figura 8 – Resíduo cerâmico utilizado neste estudo após processo de moagem | 34 |
| Figura 9 – Sequência dos ensaios realizados..... | 35 |
| Figura 10 – Compactador utilizado na moldagem dos corpos de prova | 38 |
| Figura 11 – Corpos de prova em tempo de cura | 38 |
| Figura 12 – Prensa CBR utilizada para o ensaio de resistência à compressão | 39 |
| Figura 13 – Ensaio de contração/expansão..... | 40 |
| Figura 14 – Condutímetro microprocessado portátil utilizado nos ensaios | 41 |
| Figura 15 – Peagâmetro de bancada utilizado nos ensaios | 42 |
| Figura 16 – Amostras para ensaio de pH e condutividade elétrica | 42 |
| Figura 17 – Ilustração do ensaio de pH e condutividade elétrica | 43 |
| Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura..... | 44 |
| Figura 19 – Curva granulométrica do solo..... | 45 |
| Figura 20 – Ensaio de limite de liquidez..... | 46 |
| Figura 21 – Difratoograma de raio-X da amostra de solo..... | 47 |
| Figura 22 – Granulometria do resíduo cerâmico | 49 |
| Figura 23 – Difratoograma de raio-X do resíduo cerâmico | 50 |
| Figura 24 – Curva de compactação do solo puro | 51 |
| Figura 25 – Curvas de compactação para as diferentes misturas estudadas | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 – Resistência à compressão para amostras com porcentagem de 8% | 53 |
| Figura 27 – Resistência à compressão para amostras com porcentagem de 10% | 54 |
| Figura 28 – Resistência à compressão para amostras com porcentagem de 12% | 55 |
| Figura 29 – Comparativo entre porcentagens e tempo de cura | 56 |
| Figura 30 – Valores de pH para as misturas estudadas | 59 |
| Figura 31- Valores de condutividade elétrica para as misturas estudadas | 60 |
| Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura do solo puro | 61 |
| Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 12/0 | 62 |
| Figura 34 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 12/30 | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição química do cimento Portland | 33 |
| Tabela 2 – Composição das misturas | 37 |
| Tabela 3 – Dados do limite de plasticidade | 46 |
| Tabela 4 – Composição química do solo | 47 |
| Tabela 5 – Composição química do resíduo cerâmico | 48 |
| Tabela 6 – Valores limites de expansão | 56 |
| Tabela 7 – Médias solo puro e solo cimento (8, 10, 12%) | 57 |
| Tabela 8 – Médias solo-cimento (8%) com resíduo cerâmico | 57 |
| Tabela 9 – Médias solo-cimento (10%) com resíduo cerâmico | 57 |
| Tabela 10 – Médias solo-cimento (12%) com resíduo cerâmico | 58 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | CONSIDERAÇÕES GERAIS | 12 |
| 1.2 | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 13 |
| 2 | OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 16 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 17 |
| 3.1 | SOLOS COLAPSÍVEIS | 17 |
| 3.2 | ESTABILIZAÇÕES CONVENCIONAIS DE SOLOS | 20 |
| 3.2.1 | Estabilização mecânica | 21 |
| 3.2.2 | Estabilização física | 21 |
| 3.2.3 | Estabilização química | 22 |
| 3.3 | RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA | 25 |
| 4 | PROGRAMA EXPERIMENTAL | 31 |
| 4.1 | MATERIAIS | 31 |
| 4.1.1 | Solo | 31 |
| 4.1.2 | Cimento portland | 32 |
| 4.1.3 | Resíduo cerâmico | 33 |
| 4.1.4 | Água | 34 |
| 4.2 | METODOLOGIA | 35 |
| 4.2.1 | Determinação das curvas de compactação | 36 |
| 4.2.2 | Moldagem dos corpos de prova | 37 |
| 4.2.3 | Ensaio de resistência à compressão | 39 |
| 4.2.4 | Ensaio de contração/expansão | 40 |
| 4.2.5 | Medidas de pH e condutividade elétrica | 41 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.6 | Microscopia eletrônica de varredura | 43 |
| 5 | RESULTADOS | 44 |
| 5.1 | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS..... | 44 |
| 5.1.1 | Solo..... | 44 |
| 5.1.2 | Resíduo cerâmico..... | 47 |
| 5.2 | CURVAS DE COMPACTAÇÃO..... | 49 |
| 5.3 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO..... | 52 |
| 5.4 | ENSAIOS DE CONTRAÇÃO/EXPANSÃO | 55 |
| 5.5 | MEDIDAS DE PH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA | 58 |
| 5.6 | MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA | 59 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 64 |
| | REFERÊNCIAS | 66 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As questões ambientais têm sido discutidas mundialmente, promovendo desde ações políticas a acadêmicas. Assim, universidades e centros de investigações estão direcionando suas atividades para o desenvolvimento de pesquisas e de novas tecnologias que atendam às questões ambientais, sociais e econômicas atuais.

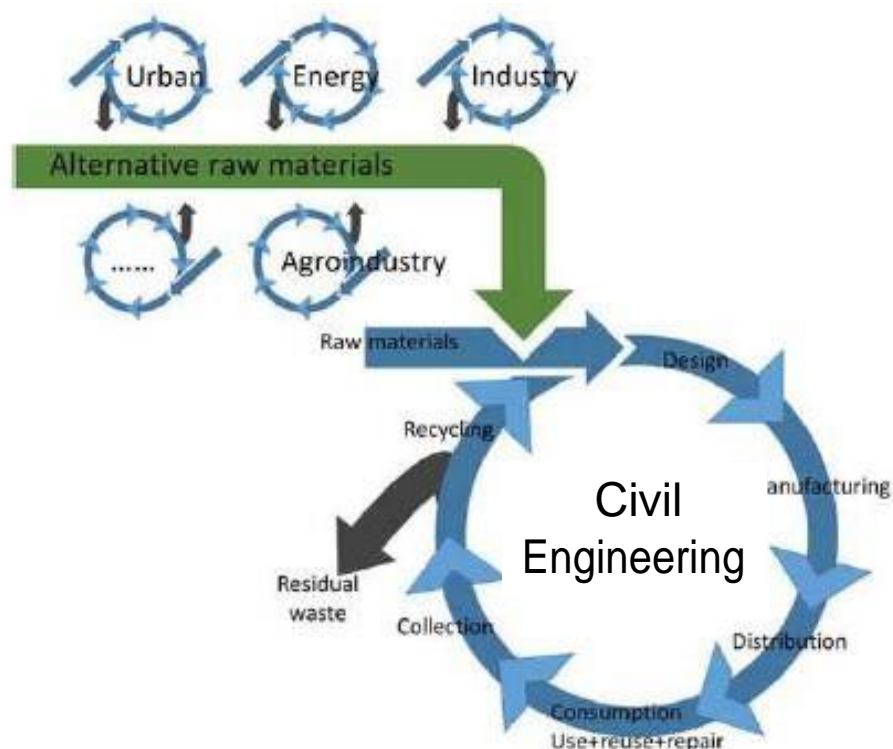
Um destes problemas ambientais é a geração de resíduos, que geralmente, são descartados de maneira inadequada, apresentando risco de contaminação ao meio ambiente e risco à saúde humana.

Neste contexto, a aplicação de conceitos como *sustentabilidade* e *economia circular* incrementam a busca de alternativas para o emprego e valorização dos resíduos (PAYÁ *et al.*, 2016). O desenvolvimento deste tipo pesquisa é uma medida favorável pois promove a redução do consumo de matérias-primas, energia, e das emissões de gases de efeito estufa, além de melhorar a qualidade e as características dos produtos obtidos.

Neste sentido, a engenharia civil tem mostrado um enorme potencial para a reutilização de resíduos urbanos, industriais, agropecuários e, até mesmo reempregar os próprios resíduos da construção civil (PRASARA-A *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; KREJCIRIKOVA *et al.*, 2019), como é o caso do resíduo procedente da cerâmica vermelha (SIDDIQUE *et al.*, 2019).

A Figura 1 mostra uma alternativa para a aplicação do conceito de economia circular no âmbito da engenharia civil, onde o sucesso deste conceito está relacionado ao uso de “matérias-primas alternativas” provenientes de outras atividades.

Figura 1 - Economia Circular aplicada na engenharia civil.



Fonte: adaptado de Payá *et al.* (2016).

O solo é considerado pela engenharia como material de construção e de sustentação das obras. Para tanto, deve apresentar certas propriedades, para que seja capaz de conferir estabilidade e resistência mecânica aos esforços e cargas a que serão submetidos durante a vida útil de uma obra de engenharia (VARGAS, 1977).

Para os casos em que o solo da região não apresente as características geotécnicas exigidas para suportar uma obra de engenharia, três alternativas técnicas podem ser avaliadas:

- A modificação do dimensionamento do projeto;
- A substituição do solo existente por outro de comportamento satisfatório;
- A estabilização química ou mecânica deste solo.

A primeira alternativa, que leva a uma alteração radical do projeto, a partir do redimensionamento do mesmo, só deve ser considerada em último caso, pois significa uma

ruptura com a concepção inicial do projeto, significando, normalmente, um custo muito maior do que o previsto.

No segundo caso, a remoção e substituição do solo de origem, por materiais com características geotécnicas satisfatórias pode significar, em muitas situações, o transporte de grandes volumes de materiais a grandes distâncias. Isso pode encarecer a construção, pois há um aumento do custo total da obra, além de uma dilatação do tempo de execução da mesma.

A opção pela estabilização do solo possibilita, em algumas situações, a utilização dos solos encontrados no local da obra, reduzindo custo e tempo de execução da obra. A estabilização dos solos pode ser obtida pelo uso de várias técnicas que podem ser reunidas em dois diferentes grupos:

- **Estabilização Mecânica:** técnicas que empregam meios mecânicos, como a correção da granulometria e plasticidade, com adição e subtração de quantidades definidas de suas frações constituintes, até que se obtenham os parâmetros estabelecidos por norma;
- **Estabilização Química:** técnicas que empregam meios químicos utilizando aditivos orgânicos ou inorgânicos como, por exemplo, materiais betuminosos e resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland e outros.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A colapsividade dos solos é um destes problemas de estabilidade mencionados acima e que pode ser melhorado através de um processo de estabilização seja ela mecânica ou química. Trata-se de um condicionante geotécnico que merece grande destaque, estudos e compreensão, devido a sua potencialidade de promover danos com prejuízos financeiros, ambientais, sociais e ao poder público.

O colapso dos solos pode ser definido como uma deformação do solo que depende de sua metaestabilidade estrutural diante de alterações no estado de tensões, do equilíbrio eletromagnético e de ataques sobre as ligações cimentícias dos solos. Ao umedecer um solo colapsível, o colapso pode ser desencadeado devido a um desequilíbrio na estrutura que ocorre pela redução da capacidade de vinculação entre as partículas, o que resulta na

diminuição dos mecanismos de suporte (DUDLEY, 1970; REGINATTO; FERRERO, 1973; JENNINGS; KNIGHT, 1975; LOURENS; CZAPLA, 1987).

Diante dessa conjunção de fatores, esta pesquisa foi proposta com duas finalidades: (1) melhoria de performance do solo, sendo estudados parâmetros mecânicos e hidráulicos afim de promover a estabilização do solo laterítico em estudo e (2) preocupação com a questão ambiental, promovendo o reaproveitamento do resíduo cerâmico vermelho proveniente do descarte de olarias.

1 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é estudar a aplicação do resíduo cerâmico proveniente do descarte de olarias em misturas de solo-cimento para estabilização de um solo laterítico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Avaliar a resistência à compressão dos corpos de prova;
- b. Avaliar o efeito de expansão e contração dos corpos de prova;
- c. Avaliar pH e condutividade elétrica dos corpos de prova;
- d. Avaliar a microestrutura dos corpos de prova;
- e. Avaliar a proporção ideal de mistura (resíduo cerâmico + cimento Portland).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SOLOS COLAPSÍVEIS

O conhecimento do comportamento de um solo é determinante em projetos de geotecnia e na resolução de problemas muito comuns na prática da engenharia. Porém, é comum se observar negligência na execução de obras geotécnicas, como falta de ensaios laboratoriais e ensaios de campo e controle ineficiente da compactação em campo. Esses fatores levam a formação de solos com elevada porosidade e que, quando submetidos à variações climáticas, períodos de seca e períodos de chuvas intensas, sofrem considerável deformação (MEDERO, 2005).

Os solos colapsíveis são aqueles que sofrem com o efeito do colapso. Eles apresentam características comuns às citadas acima como: elevada porosidade e baixa saturação. (DUDLEY, 1970). A principal característica dos solos colapsíveis é a presença de estruturas instáveis que podem sofrer deformações volumétricas consideráveis (redução do índice de vazios) quando umedecidos, com ou sem acréscimo de sobrecarga (RODRIGUES, 2003).

Essa deformação volumétrica, que é normalmente conhecida como colapso, também pode ser referenciada por outros termos como: hidrocompactação e hidroconsolidação (DUDLEY, 1970) e subsidência (FEDA, 1996; GIBBS; BARA, 1967).

A estrutura do solo colapsível apresenta uma macroporosidade, fazendo com que as partículas se mantenham unidas devido a fenômenos como capilaridade, forças eletromagnéticas ou pela presença de agentes cimentantes (DUDLEY, 1970; NUÑES, 1975). Porém, apesar dessa aparente estabilidade, quando umedecidos, ocorre a destruição desse equilíbrio, a resistência do solo diminui fazendo com que haja um deslocamento das partículas e um preenchimento dos espaços vazios da estrutura do solo, o que resulta na redução do índice de vazios e consequente deformação.

Para a ocorrência do colapso é necessário a existência de 3 condições que predispõem os solos colapsíveis ao fenômeno. São elas: (BARDEN *et al.*, 1973):

1. Existência de um solo com estrutura parcialmente saturada porosa e potencialmente instável;
2. Existência de uma pressão aplicada que aumente a instabilidade do solo;

3. Presença de um alto valor de sucção que estabilize os contatos intergranulares e que são susceptíveis de enfraquecimento quando saturados.

Em geral, instabilidade estrutural dos solos colapsíveis é um causador de sérios problemas econômicos, principalmente após as instalações de obras civis (RODRIGUES, 2003). Neste sentido, é importante destacar que devido ao crescimento populacional e a falta de planejamento urbano, diversas obras vem sendo realizadas sem os devidos cuidados gerando patologias após poucos anos de construção (METHA, 2007).

Araki (1997) avalia que além de danos em fundações, o colapso do solo pode provocar danos em pavimentos, ruptura e deslizamentos de taludes, desabamento de túneis, recalques diferenciais, etc.

Rodrigues (2003) cita que em casos extremos, especialmente quando se tratam de construções antigas e com projetos de fundações inadequados, os danos podem ser tão extensos que a edificação pode ruir.

Um dos primeiros registros da ocorrência de colapso ocorreu na Ucrânia, quando uma escola apresentou inclinação acentuada após um incêndio, pois a água utilizada para apagar o incêndio infiltrou no solo e provocou a deformação na estrutura. (CINTRA 2004; RODRIGUES, 2007).

No Brasil há registros do início dos anos 90, em Pereira Barreto - SP, próximo a região deste estudo, onde ao sofrer elevação do nível freático devido ao enchimento do reservatório da UHE Três Irmãos, diversos recalques de fundações próximas à represa foram observados (RODRIGUES, 2007).

Vários estudos relataram sobre as condições do solo e seus respectivos problemas, como exemplifica a figura abaixo (RODRIGUES, 2007; GUTIERREZ *et al.*, 2009; BENATTI; MIGUEL, 2013).

Figura 2 – Danos causados a edificações devido a presença de solo colapsível.



Fonte: (RODRIGUES, 2007).

Algumas regiões do planeta apresentam condições que favorecem o surgimento de solos colapsíveis, em especial regiões que alternam entre estações muito chuvosas e muito secas, o que favorece o surgimento de solos de elevada porosidade, como solos da região Centro-Sul do Brasil, ou mesmo em regiões com baixo valor de umidade de solo, como regiões áridas e semiáridas como o nordeste brasileiro (VILAR et al., 1981). No caso do território brasileiro, aproximadamente 1,7 milhões de km² são cobertos por solos colapsíveis, como mostra a figura 3.

Figura 3 – Presença de solos colapsíveis no Brasil.



Fonte: (FERREIRA et al., 1989).

3.2 ESTABILIZAÇÕES CONVENCIONAIS DE SOLOS

O solo pode ser considerado como o material de construção civil mais comum e de maior abundância na crosta terrestre. Com a racionalização dos recursos naturais, a tendência ao resgate do uso do solo como material de construção tem se intensificado, tendo seu comportamento físico-mecânico melhorado por meio de um processo chamado de estabilização (VARGAS, 1977).

Dá-se o nome de estabilização ao processo que confere ao solo uma maior resistência às solicitações mecânicas ao desgaste ou à erosão, utilizando de processos como compactação, correção granulométrica, correção da plasticidade ou através da adição de substâncias que provoquem cimentação ou aglutinação dos grãos (VARGAS, 1977).

Ou ainda, é definida como um método que visa aumentar, de maneira durável, durante todas as estações do ano, a resistência de um material aos esforços desenvolvidos pelo tráfego e aos efeitos destruidores causados pelas intempéries (VOGT, 1971).

As propriedades de interesse da engenharia que se visa modificar com o processo de estabilização de um solo, segundo Medina e Motta (2004), são:

- Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver e transmitir;
- Permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a;
- Compressibilidade, reduzindo-a.

A estabilização de solos é um método eficiente de tratamento de solos, fornecendo a eles um ganho estrutural. Pode ser considerado um método rápido e de baixo custo, se comparado à substituição do solo com corte e conseqüente aterro, atividades que exigem escavação e transporte (KAWAHASHI *et al.*, 2010).

Diversos autores comentam que estabilização de solos fornece aos mesmos aumento da resistência ao cisalhamento, redução de recalques e diminuição da expansão (GIDLEY; SACKC, 1984 ;BASHA *et al.*, 2005).

O processo de estabilização visa ocupar os vazios e reduzir a variação volumétrica, além de melhorar o arranjo estrutural das partículas de solo por meio da criação de uma nova liga estrutural (AMORIM, 2004).

Podem-se destacar três métodos de estabilização de solos: mecânico, físico e químico, podendo ser adaptados e combinados para a solução de um problema.

Devido à grande diversidade de tipos de solos, os métodos não se aplicam genericamente a todos os solos, cada método pode ser aplicado (ou não) para um determinado tipo de solo. A estabilização de solos não só deveria ser pensada em termos de tratamento corretivo, mas também como uma medida preventiva contra adversidades que venham a se desenvolver no curso da construção ou ao longo da vida da estrutura (INGLES; METCALF, 1973).

3.2.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica é um processo que visa melhorar o comportamento mecânico do solo através de do uso de equipamentos que melhorem o desempenho do solo (redução do índice de vazios, redução da porosidade) como sua compactação (OYELAMI; VAN ROOY, 2016).

A estabilização mecânica por compactação é o processo de tratamento de um solo afim de minimizar sua porosidade pela aplicação de cargas sucessivas, já que a diminuição do volume de vazios está relacionada ao ganho de resistência mecânica (SOLIZ, 2007).

3.2.2 Estabilização física

Por outro lado, a estabilização física, como também a química, envolve a adição de materiais que são estranhos ao solo, proporcionando as melhorias desejadas. Portanto, na estabilização física, tais materiais mudam algumas características do material, como por exemplo a textura. O que difere a estabilização química da física é principalmente a adição de produtos químicos, que servirão, na maioria das vezes, como aglomerantes (MAKUSA, 2013).

Outras técnicas envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (MACÊDO, 2004).

3.2.3 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que influenciam as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do mesmo (SANTOS *et al.*, 1995; SOLIZ, 2007).

A estabilização química quando utilizada para solos granulares visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados para estabilização química são o Cimento Portland, Cal, materiais betuminosos, resinas, entre outros. Vargas (1977) cita que o uso de estabilizantes, visa aumentar o grau de cimentação entre os grãos ou preservar as forças coloidais que os mantêm unidos, sendo seu uso justificado pelo custo benefício do estabilizante.

Na estabilização química, existem reações importantes que devem ser levadas em conta entre o aglomerante utilizado e o solo. São elas: troca catiônica, floculação, hidratação e as reações pozolânicas (SARGENT *et al.*, 2012).

A hidratação é uma das reações que merecem maior destaque, por ser responsável principalmente por permitir que a troca catiônica, floculação e as reações pozolânicas ocorram. Tanto a troca catiônica quanto a floculação são reações que ocorrem imediatamente após o emprego do material aglomerante, podendo durar até horas depois. Uma das principais mudanças da troca catiônica é a redução da água adsorvida pelo solo. Por sua vez a floculação irá causar uma reestruturação das partículas de argila. Por fim, as reações pozolânicas levam um tempo muito maior para ocorrer que as outras reações. Elas irão ser responsáveis por tornar o solo mais rígido, resistindo a erosão, dissolução, e tornando-o menos suscetível a reações de retração e expansão (SARGENT *et al.*, 2012).

Geralmente, existem dois materiais que são os mais utilizados quando o assunto é estabilização química. São eles: cimento e a cal. O cimento é um aglomerante muito versátil tendo amplas aplicações com a engenharia, e é usado na estabilização de solos desde a

década de sessenta. Este depende da água presente no solo, realizando assim a reação de hidratação, sendo aplicado para diversos tipos de solo. Porém, a diversidade de solos existente influencia diretamente nas propriedades dos solos estabilizados (MAKUSA, 2013).

Existem vários fatores que podem interferir na estabilização do solo com cimento. Entre eles pode-se destacar: temperatura, presença de impurezas, o tamanho da superfície da mistura e também a relação água/cimento. As alterações que a adição de cimento causa no solo estabilizado vão de ganho de força e até mesmo a diminuição da plasticidade do solo (MAKUSA, 2014).

Por sua vez, a estabilização do solo utilizando a cal se dá devido à uma reação entre a água, a cal e os elementos pozolânicos do solo, que dão origem a silicatos e aluminatos hidratados, fazendo com que ocorra a cimentação (AZEVEDO, 2010).

Estabilização com cal geralmente é mais utilizada para fins geotécnicos e ambientais. Entretanto, deve-se atentar para a presença de materiais que podem inibir ou diminuir a efetividade da estabilização, como por exemplo enxofre e sulfatos (MAKUSA, 2014).

Existem ainda muitas pesquisas sobre os diversos tipos de materiais que podem ser empregados na estabilização química dos solos. Pode-se citar como exemplo: cloretos (SINGH, 1999) e cinzas volantes (MAKUSA, 2014).

No solo-cimento e solo-cal existe, inicialmente, uma reação que se caracteriza como físico-química: os cátions Ca^{+2} liberados pela hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam depois acrescentam rigidez a mistura já que formam compostos com propriedades cimentantes, chamado de reação pozolânica (MEDINA, 1987).

Solo-Cimento

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (1986) o solo-cimento é produto resultante da mistura íntima de solo, cimento Portland e água que, compactados ao teor ótimo de umidade e sob a máxima densidade, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento.

O início da utilização deste material no Brasil data de 1936 e, atualmente, uma vasta literatura sobre o assunto pode ser encontrada (BARBOSA *et al.*, 1997).

Na estabilização do solo com o cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado (ABIKO, 1980).

A durabilidade do solo-cimento depende da ligação que irá se estabelecer entre partículas de cimento e do solo. Outro fator importante para a durabilidade é a forma e o tamanho das partículas, onde partículas arredondadas, por exemplo, produzem pouca durabilidade e baixa resistência (DA COSTA, 2005).

Deve-se levar em conta também a cura do cimento. Esta é um conjunto de operações ou procedimentos para se evitar a evaporação da água de amassamento (água que será empregada no concreto, parte reagirá e parte dará fluidez) e hidratação do cimento presente nas regiões superficiais do material. A cura tem por finalidade impedir a perda de água, controlar a temperatura e suprir água para as reações de hidratação (SEGANTINI, 2000).

Existem alguns fatores que são extremamente importantes para garantir características ao solo-cimento. Os principais fatores que podem interferir nas propriedades do solo-cimento são: tipo de solo; teor de cimento; teor de água e a compactação.

O tipo de solo está ligado ao tamanho das partículas. Partículas grandes, consideradas inertes, como pedregulhos são benéficas pela função de enchimento e resistência mecânica. Partículas finas em grandes quantidades atribuem pouca resistência inicial, prejudicando a compactação. Outro fator é a composição de matéria orgânica presente no solo (DA COSTA, 2005).

Por sua vez, o teor de cimento, que é dado em porcentagem de massa, é diferente para cada tipo de solo (valores que vão de 5 à 15%), sendo necessário seguir as especificações das normas vigentes.

O teor de umidade nada mais é que a quantidade de água a ser adicionada de forma que propicie à mistura maior massa específica e garanta a pega do cimento.

Por fim, a compactação tem a finalidade de aumentar a resistência e a massa específica. Para solos argilosos o corpo de prova deve ser compactado com variações de 1 a 2% da umidade ótima. Já para solos arenosos a compactação deve ser feita com umidade igual ou levemente inferior à ótima (DA COSTA, 2005).

O uso de cimento e cal em estabilização é bastante comum, no entanto o processo de fabricação desses estabilizantes tradicionais consome elevada energia com grande emissão de gás carbônico. Surgem então novas opções de estabilizantes como escória de alto forno da produção de cimento Miller e Azad (2000), Peethamparan, Olek e Lovell (2008), cinza de casca de arroz Basha *et al.* (2005), cinza de lodo de esgoto Lin *et al.* (2007), Chen e Lin (2009), geopolímeros Zhang *et al.* (2013) e resíduo cerâmico Siddique *et al.* (2019).

3.3 Resíduo de cerâmica vermelha

De acordo com Isaia (2010), cerâmicas vermelhas são originadas a partir da argila (normalmente encontrada nos sedimentos de rios e barragens), que é submetida ao processo de secagem e posteriormente a queima em elevadas temperaturas. Após a queima, as cerâmicas apresentam como resultado uma coloração avermelhada devido à argila apresentar teor de ferro em sua composição.

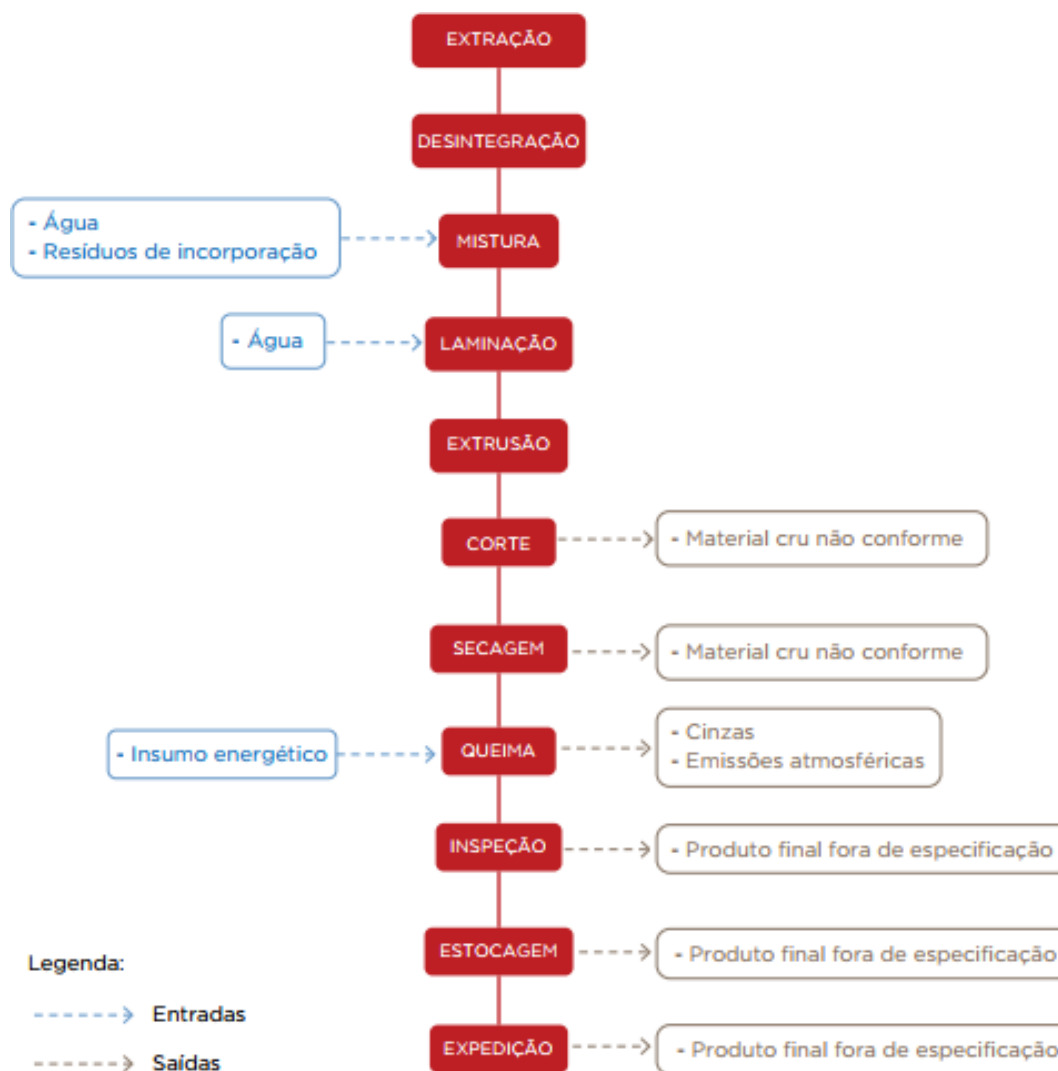
Essa matéria prima (argila) é a base para a criação dos produtos, sendo utilizada no processo de fabricação desde 5000 a.C, onde já se usavam tijolos, telhas e blocos cerâmicos em construções civis além de trabalhos com pinturas que já eram muito utilizados na Grécia e na China. (ITAÚ, 2006).

A mais de 2000 anos, bem antes do domínio português, no Brasil já havia produção de materiais cerâmicos. A origem desses materiais cerâmicos está vinculada às culturas avançadas dos indígenas, habitantes do Brasil na época, que fabricavam potes, baixelas e outros produtos para uso doméstico. A sua utilização está presente em materiais da construção civil, tais como: tijolos maciços, blocos cerâmicos, telhas e outros (GALLUCCI; CUNHA, 2008).

Nos últimos anos, a indústria da construção civil brasileira passou por uma grande expansão, tendo em vista o aumento de crédito por parte do apoio de bancos ao setor produtivo, para obras de infraestrutura, construção de casas populares e grandes eventos no cenário brasileiro, ocasionando um forte aquecimento do mercado. O segmento da Cerâmica Vermelha é de grande importância, com relação à produção de tijolos, telhas, lajotas, blocos de vedação e estruturais, sendo estes a base da construção civil. (NETCERAMICS, 2009).

O processo de produção da Cerâmica Vermelha é feito através de etapas, que de modo geral, vai desde a extração da matéria prima, a conformação das peças, a calcinação e expedição destas, como mostra a figura 4. Destaca-se que todos os produtos finais fora de especificação tornam-se resíduos.

Figura 4 – Fluxograma do processo de produção da Cerâmica Vermelha.



Fonte: (ABCERAM, 2013).

O setor cerâmico no Brasil constitui um dos maiores conglomerados industriais do gênero no mundo, tendo uma grande importância econômica para o Brasil, com uma participação no PIB brasileiro de quase 1,0%. Parte importante desse setor, a indústria de cerâmica vermelha no Brasil, também denominada cerâmica estrutural, envolve a produção de elementos estruturais, de vedação e de acabamento para a construção civil (telhas, blocos estruturais e de vedação, tubos, lajotas e pisos) e responde por um faturamento de R\$ 18,0 bilhões/ano (EELA, 2012).

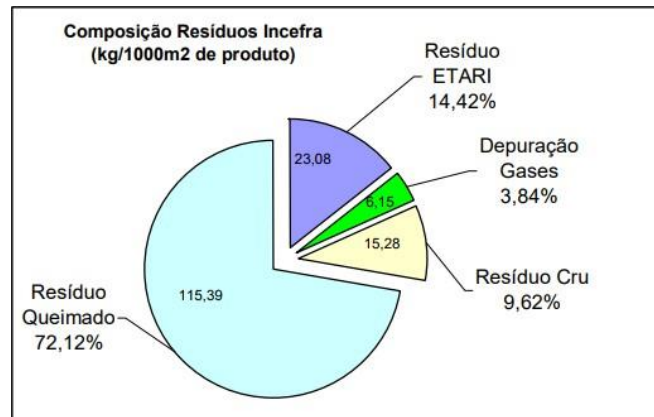
Dentro da indústria de transformação, o setor da Cerâmica Vermelha, produz um volume considerável de resíduos durante o processo fabril, em função da fragmentação das peças, da existência de não conformidades de forma, da queima irregular, entre outros, como mostram as figuras 5 e 6 abaixo. Na Figura 6, destaca-se que o resíduo cru pode voltar ao processo de mistura.

Figura 5 – Exemplos de resíduos gerados pelo setor da Cerâmica Vermelha.



Fonte: (FERREIRA, 2012).

Figura 6 – Composição dos resíduos obtidos no processo de fabricação de placas cerâmicas.



Fonte: (INCEFRA, 2001).

Um material que pode ser utilizado como estabilizante do solo é o resíduo cerâmico, proveniente da construção civil e de olarias (Ay; Ünal, 2000). Segundo Pinto (2009), o Brasil gera cerca de 90 kg por habitante por ano desse resíduo, que é quase todo lançado ao meio ambiente, sem nenhum tratamento.

Esse resíduo é composto basicamente por silicato de alumínio hidratado e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de vários outros minerais característicos da região, na qual é encontrada, como por exemplo: feldspato, silicatos, carbonatos, fosfatos e outros elementos.

A maioria das argilas, com as quais se fabricam blocos cerâmicos, em estado natural possui pequena atividade pozolânica porém, quando calcinada a uma temperatura da ordem de 700 a 900°C, torna-se reativa. O tratamento térmico destrói a estrutura cristalina da argila e a transforma em uma estrutura sílicoaluminosa amorfa. Este material, quando moído, apresenta composição físico-química dentro das especificadas pela ASTM 618 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERILAS - ASTM, 1992) para uso como adição mineral em misturas com cimento Portland.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2012), material pozolânico são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes. A cerâmica vermelha é considerada um material deste tipo.

Em relação aos problemas ambientais causados pela indústria do cimento, vários estudos trabalham para reduzir a emissão de gases do efeito estufa. A substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares pode reduzir de 886 kg para 660 kg as emissões de CO₂ associadas à produção de 1 tonelada de cimento Portland (WORLD STUDENT COMMUNITY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT- WSCSD, 2009).

Além disso, a fabricação do cimento é responsável pela emissão de vários gases, especialmente o dióxido de carbono (CO₂). De acordo com Malhotra (2002), cerca de 7% de todas as emissões de CO₂ (aproximadamente 1,4 bilhão de toneladas/ano) se devem à produção de cimento Portland. Outros autores dizem que o cimento é responsável por pelo menos 5% a 8% das emissões globais de CO₂ (FERNANDEZ-JIMENEZ; PALOMO, 2011).

Segundo Torgal, Castro Gomes e Jalalis (2005), a produção de 1 tonelada de cimento gera 0,55 tonelada de CO₂ de origem química (reação de descarbonatação do calcário: $3\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3\text{CO}_2$), às quais deve ser adicionada 0,39 tonelada de CO₂ em função do uso de combustíveis fósseis para a produção de energia necessária ao processo. Dado mais recente indica que para cada tonelada de clínquer produzido são lançados na atmosfera 870 kg de CO₂ (RUIZ SANTAQUITERIA; FERNANDEZ-JIMENEZ; PALOMO, 2009). Sá *et al.* (2011) informa que cerca de 670 kg de CO₂ se devem à produção de 1 tonelada de cimento Portland no Brasil.

A grande produção de cimento Portland se deve, principalmente, à versatilidade do aglomerante, à existência de recursos naturais para sua fabricação e a seu custo relativamente baixo. No entanto, a produção de cimento Portland requer grande quantidade de recursos naturais não renováveis e de energia. A produção de 1 tonelada de cimento consome em torno de 1,6 tonelada de recursos naturais (JENNINGS; BULLARD, 2011). Uma indústria de cimento eficiente consome perto de 100kWh por tonelada de cimento produzido (GARTNER; MACPHEE, 2011).

Atualmente, as pozolanas tem ganhado destaque na substituição parcial do cimento Portland, melhorando a durabilidade do concreto e reduzindo a emissão de CO₂. Além disso, a pozolana melhora a densificação da matriz, como também diminui a quantidade de hidróxido de cálcio, melhorando contra ataques de ácido. Isso tudo faz com que as pozolanas contribuam para uma produção mais econômica e durável (SENHADJI *et al.*, 2014).

Os materiais pozolânicos são classificados, segundo a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 1992b), em três diferentes categorias. A classe N engloba as pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂), terras diatomáceas e argilas calcinadas. Na classe C estão nomeadas as cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. A classe E refere-se a pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores (escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral).

Nos últimos anos diversas pesquisas têm sido realizadas visando à redução do custo, tanto do concreto quanto da estabilização do solo, através da substituição parcial do cimento Portland por diversas adições minerais, tais como: cinza de casca de arroz, sílica ativa, cinza volante, entre outros (ROLIM; FREIRE, 1998; AKASAKI; SILVA, 2001; FARIAS FILHO *et al.*, 2001).

Essas adições minerais possuem alguma sílica e alumínio em forma amorfa que, na presença da água, podem combinar-se quimicamente com a cal oriunda da hidratação do cimento, para formar compostos semelhantes aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, que se denomina de reação pozolânica (DALLACORT *et al.*, 2002).

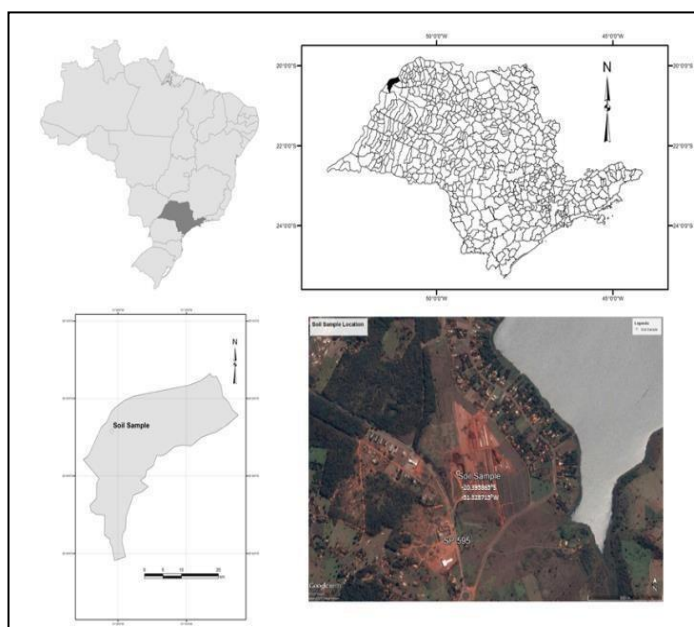
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Solo

O solo empregado neste estudo foi coletado na área de empréstimo denominada como Torre Novo. Esta área localiza-se no município de Ilha Solteira, ao lado do Laboratório de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp. O solo utilizado nesta pesquisa, bem como sua localização, está mostrado na figura 7.

Figura 7 – Localização do solo utilizado nos ensaios.



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE (2018), Google Maps (2018).

Após a coleta (amostra deformada) e, visando destorroar e facilitar o seu manuseio, o solo foi passado inicialmente pela peneira #10 da ASTM. Para a caracterização do solo, foram realizados ensaios de caracterização física dos solos: limite de liquidez (LL) ABNT NBR 6459 (1984), limite de plasticidade (LP) NBR 7180 (ABNT- 1984), granulometria NBR 7181 (ABNT- 1984), massa específica dos sólidos NBR 6508 (ABNT- 1984), proctor normal NBR 7182 (ABNT- 1986) e mini proctor.

Além disso, foram realizados ensaios de fluorescência de Raios-X (FRX, determinação da composição química) e de difração de Raios-X (DRX, determinação da mineralogia).

O método de funcionamento da Fluorescência de Raios-X se inicia com uma radiação primária fazendo com que os elétrons de camadas interiores sejam expulsos. Os elétrons de camadas mais externas ocupam esses lugares. O excesso de energia dessa transição se dissipa em forma de fótons, que é chamada de radiação secundária ou Raio-X Fluorescente. Juntamente com o conhecimento de cada radiação secundária característica de cada elemento, podemos identifica-los através do equipamento. Para medir a concentração do elemento, mede-se a intensidade da energia que ele produz a cada transição de elétrons (TASHIMA, 2012).

Já o Difratorômetro de Raios-X (DRX) foi utilizado para determinar a mineralogia do resíduo cerâmico. A técnica consiste em medir o desvio de Raios-X que incide na amostra para determinar cristais. O método de funcionamento do Difratorômetro de Raio-X se dá pela medição do desvio da incidência de feixe primário de Raio-X na amostra (TASHIMA, 2012). Os ângulos de difração estão relacionados com a distância entre os planos dos materiais cristalinos presentes na amostra.

4.1.2 Cimento portland

O cimento Portland empregado nesta pesquisa para a produção dos corpos de prova foi o CP V ARI (Alta Resistência Inicial) produzido por Itaú/Votorantim Cimentos, como mostra a figura abaixo. Trata-se de um cimento com mais de 95% de clínquer, ou seja, um cimento puro com valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa a 1 dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias, que superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias, respectivamente. A Tabela 1 mostra a composição química (determinada por FRX) do Cimento Portland utilizado, onde PF é perda ao fogo.

Tabela 1 - Composição química do Cimento Portland.

| óxidos | (%) |
|------------------------------------|------------|
| Al₂O₃ | 6,2 |
| SiO₂ | 18,2 |
| Fe₂O₃ | 3,2 |
| CaO | 62,3 |
| MgO | 0,7 |
| Na₂O | 0,2 |
| K₂O | 0,7 |
| SO₃ | 2,8 |
| Outros | 1,2 |
| PF | 4,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Resíduo cerâmico

Os resíduos cerâmicos foram obtidos em olarias e eram constituídos por blocos cerâmicos com pequenas trincas, provocadas pelo processo de queima e que, por isso, foram rejeitados no controle de qualidade da empresa.

Os mesmos foram coletados, levados ao laboratório e moídos no moinho de bolas do Laboratório de Engenharia Civil – FEIS/Unesp durante o período de 45 a 50 minutos. Após a moagem, os resíduos foram peneirados para obtenção do material fino, denominado aqui por resíduo cerâmico, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Resíduo cerâmico utilizado neste estudo após processo de moagem.



Fonte: Acervo do autor.

A caracterização do resíduo cerâmico utilizado neste estudo foi realizada através de ensaios de FRX, DRX, granulometria a laser e composição química.

A granulometria a laser tem como objetivo determinar a distribuição dos tamanhos das partículas da cerâmica. O método de funcionamento da granulometria a laser é a partir da incidência de luz monocromática sobre a partícula, onde detectores ópticos captam a dispersão da luz. Utilizando modelos ópticos que consideram a partícula como uma esfera, a distribuição do tamanho da partícula é obtida (TASHIMA, 2012).

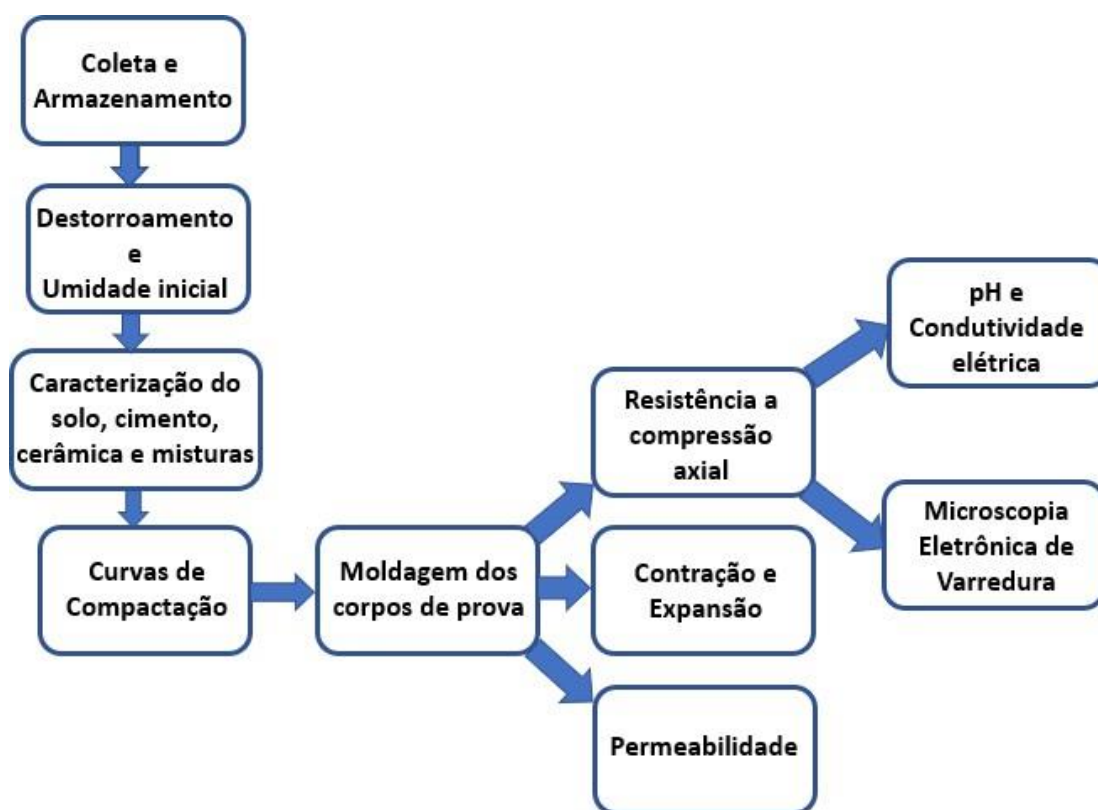
4.1.4 Água

Todos os corpos de prova deste estudo foram confeccionados utilizando água deionizada para que não houvesse interferência dos íons (Ca^{+2} , Cl^- , etc) normalmente presentes na água do sistema de abastecimento da cidade.

4.2 METODOLOGIA

Na continuação é apresentada a sequência dos ensaios realizados neste projeto (Figura 9). Após a preparação e caracterização dos materiais, procedeu-se a obtenção das curvas de compactação para todas as misturas estudadas, já que em todo o estudo foi realizado utilizando-se um grau de compactação mínimo de 95%, ou seja, trabalhou-se com umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Posteriormente, foram confeccionados os corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência à compressão, contração/expansão. Além disso, foram realizadas medidas de pH e condutividade elétrica e microscopia eletrônica de varredura para análise da microestrutura das misturas produzidas.

Figura 9 – Sequência dos ensaios realizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Determinação das curvas de compactação

O controle da compactação em solos é imprescindível já que as propriedades mecânicas e hidráulicas dos mesmos estão diretamente relacionadas com a compactação. Neste projeto foi utilizado um grau de compactação de 96%, valor elevado e que representa o comportamento de uma mistura em estado ideal e, compatível com valores obtidos em obras.

Para isso, as curvas de compactação foram obtidas marcando-se, em ordenadas, os valores dos pesos específicos secos (γ_d) e, em abscissas, os teores de umidade correspondentes (w). O peso específico seco máximo ($\gamma_{d_{máx}}$) é a ordenada máxima da curva de compactação e a umidade ótima (w_{ot}) é o teor de umidade correspondente ao peso específico máximo. O ensaio foi realizado seguindo as especificações de ensaio da Compactação Miniatura para Solos Tropicais (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER, 1994).

Na continuação são descritas as principais etapas para a realização do ensaio de compactação em miniatura:

- a) Toma-se uma certa quantidade de material seco ao ar e faz-se o destorroamento;
- b) Passagem da amostra deformada pela peneira 10 ASTM;
- c) Determinação da umidade de campo segundo NBR 6457 (ABNT- 1986);
- d) Adiciona-se água à amostra até se verificar uma certa consistência. Deve-se atentar para uma perfeita homogeneização da amostra;
- e) Compacta-se a amostra no molde cilíndrico, aplicando-se 5 golpes de cada um dos lados da amostra com o soquete;
- f) Remove-se o colarinho e a base e pesa-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado;
- g) Retira-se a amostra do molde com auxílio do extrator e coleta-se uma pequena quantidade para a determinação da umidade;
- h) Desmancha-se o material compactado até que possa ser passado pela peneira 10 ASTM, misturando-o em seguida ao restante da amostra inicial (para o caso de reuso do material);
- i) Adiciona-se água à amostra homogeneizando-a (normalmente acrescenta-se água numa quantidade da ordem de 2% da massa original de solo, em peso).
- j) Repete-se o processo pelo menos por mais quatro vezes.

4.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Após a determinação das condições de moldagem (umidade e peso específico seco), foram confeccionados 3 corpos de prova para cada ensaio a ser realizado. No total, foram estudadas 13 misturas diferentes, sendo apresentadas na Tabela 2 a composição de cada uma delas.

Tabela 2 - Composição das misturas (%).

| Nomenclatura | Solo (%) | Cimento Portland (%) | Res. Cerâmico (%) |
|--------------|----------|----------------------|-------------------|
| 0/0 | 100 | 0,000 | 0,000 |
| 8/0 | 92 | 8,000 | 0,000 |
| 8/10 | 92 | 7,200 | 0,800 |
| 8/20 | 92 | 6,400 | 1,600 |
| 8/30 | 92 | 5,600 | 2,400 |
| 10/0 | 90 | 10,000 | 0,000 |
| 10/10 | 90 | 9,900 | 0,100 |
| 10/20 | 90 | 9,800 | 0,200 |
| 10/30 | 90 | 9,700 | 0,300 |
| 12/0 | 88 | 12,000 | 0,000 |
| 12/10 | 88 | 11,880 | 0,120 |
| 12/20 | 88 | 11,760 | 0,240 |
| 12/30 | 88 | 11,640 | 0,360 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 10 mostra o aparelho compactador utilizado na moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

Figura 10 – Compactador utilizado na moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Acervo do autor.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram embalados em filme plástico e colocados na câmara úmida com o objetivo de evitar perda de água por evaporação. Os corpos de prova foram mantidos nessas condições até a data dos ensaios (Figura 11).

Figura 11 - Corpos de prova em tempo de cura.



Fonte: Acervo do autor.

4.2.3 Ensaio de resistência à compressão

É possível definir a consistência de um solo a partir de sua maior ou menor coesão, ou seja, solos mais coesivos apresentam uma maior consistência. A medida dessa consistência pode ser feita medindo a carga que o solo suporta quando é submetido a esforços de compressão (VARGAS, 1977).

O equipamento utilizado para realização do ensaio de resistência a compressão foi realizado na prensa CBR (determinação do “Índice de Suporte Califórnia” (ISC), comumente chamado de CBR). Trata-se de uma prensa manual com anel dinamométrico, com capacidade para até 5.000 Kgf (Figura 12).

Figura 12 - Prensa de CBR utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Acervo do autor.

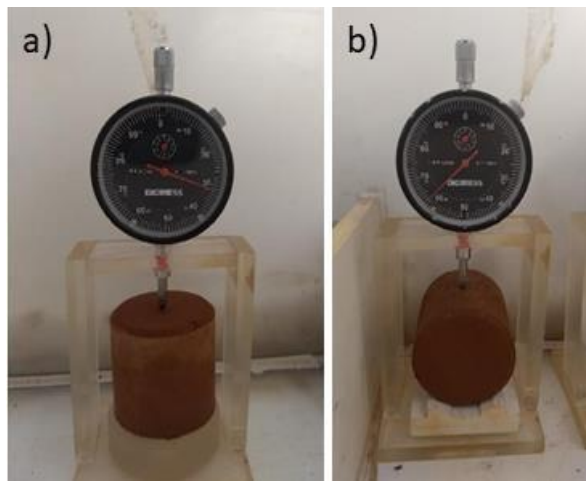
Os ensaios de compressão axial foram realizados para as idades de 0, 7, 28 e 90 dias de cura, sendo que para cada idade foram ensaiados 3 corpos de prova de cada mistura. Serão apresentados as médias dos valores assim como a desvio padrão obtido.

4.2.4 Ensaio de contração/expansão

Para registrar as leituras dos ensaios que avaliariam a variação volumétrica dos corpos-de-prova, foram utilizados o método adotado pela sistemática MCT de estudos geotécnicos

(NOGAMI; VILLIBOR, 1979, apud DA COSTA, 2005). Abaixo segue a Figura 13 e a Figura 14 que mostram respectivamente o ensaio de contração/expansão axial e diametral.

Figura 13 - Ensaio de Contração/Expansão: a) axial; b) diametral.



Fonte: Acervo do autor.

Corpos de prova para as diversas misturas foram preparados utilizando-se o procedimento descrito no item 4.2.2., sendo que imediatamente após a moldagem os corpos de prova foram deixados em ambiente de laboratório, conforme especificações da norma DNER (1994). Ao compactar eram confeccionados seis corpos-de-prova, três visando coletar a variação volumétrica axial e três visando a mediação da variação diametral do corpo-de-prova. As leituras de cada corpo-de-prova eram aferidas em intervalos de 24 horas.

Para o cálculo da variação volumétrica que o corpo de prova obteve, foi utilizada a equação abaixo:

$$C = \frac{(\textit{Leitura final} - \textit{Leitura inicial})}{\textit{Leitura inicial}} \times 100 \quad (1)$$

onde:

C é a contração ou expansão do corpo de prova.

4.2.5 Medidas de pH e condutividade elétrica

Os valores de pH foram medidos utilizando um peagômetro de bancada modelo MA522 da marca Marconi, de acordo com ASTM D 4972 e os valores de condutividade elétrica foram determinados utilizando um condutímetro microprocessado portátil modelo MCA – 150P da marca Central Brasil, que são mostrados nas figuras 14 e 15 abaixo.

Figura 14 – Condutímetro microprocessado portátil utilizados nos ensaios.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 15 – Peagômetro de bancada utilizado nos ensaios.



Fonte: Acervo do autor.

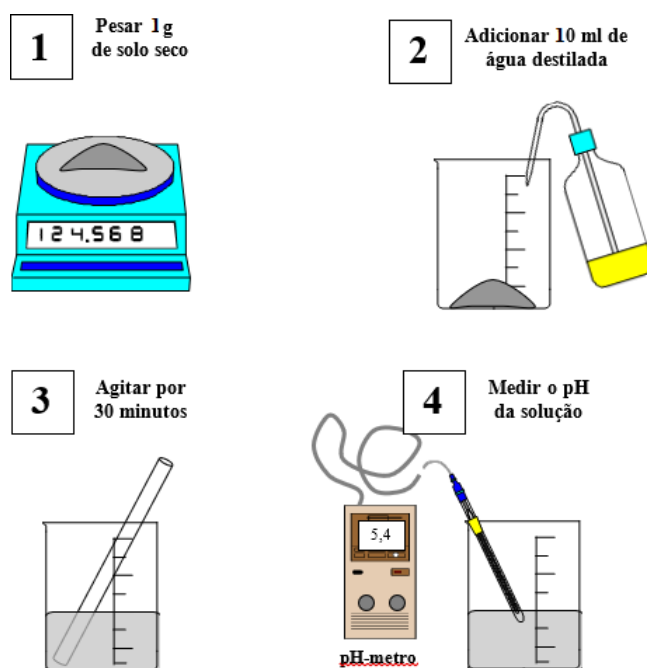
As amostras foram preparadas com pedaços pequenos provenientes da ruptura dos corpos de prova ensaiados a compressão axial, como mostra a Figura 16. Triturou-se 1g destes pedaços e adicionou-se 10mL de água deionizada por 30min e então o pH e a condutividade elétrica foram medidos. A Figura 17 abaixo ilustra o procedimento de medição de pH e condutividade elétrica.

Figura 16 - Amostras para ensaio de pH e condutividade elétrica.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 17 – Ilustração do ensaio de pH e condutividade elétrica.



Fonte: Acervo do autor.

4.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O uso da microscopia eletrônica tem como objetivo analisar a morfologia do solo e das misturas de solo com o resíduo cerâmico, bem como os compostos que foram formados após a reação de hidratação e após a reação do hidróxido de cálcio com a cerâmica. O método de funcionamento deste equipamento é a partir da varredura de feixes de elétrons na amostra. Ao varrer a superfície com elétrons de energia elevada, sinais são formados. Estes sinais podem ser elétrons retroespalhados e secundários, que são a base de microscópios eletrônicos. A partir desses sinais provenientes da energia dos elétrons, imagens são mostradas a partir de um computador (TASHIMA, 2012).

O microscópio utilizado nos ensaios foi o modelo EVO LS 15 fabricado de Carl Zeiss, do Departamento de Física e Química da Unesp/Ilha Solteira, como mostra a Figura 18 abaixo.

Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Acervo do autor.

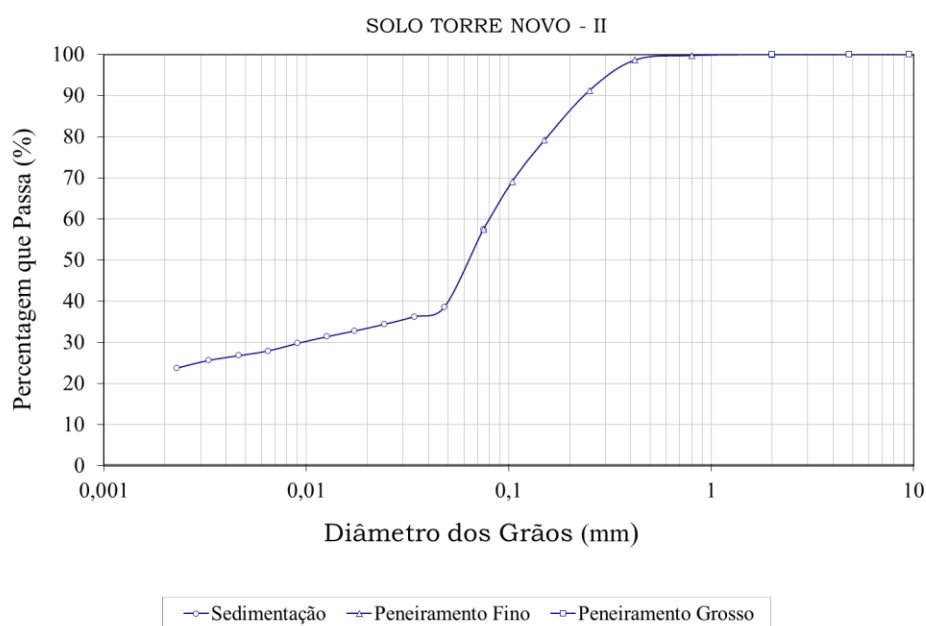
5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Solo

A Figura 19 mostra a curva granulométrica (peneiramento e sedimentação) obtida para o solo em estudo.

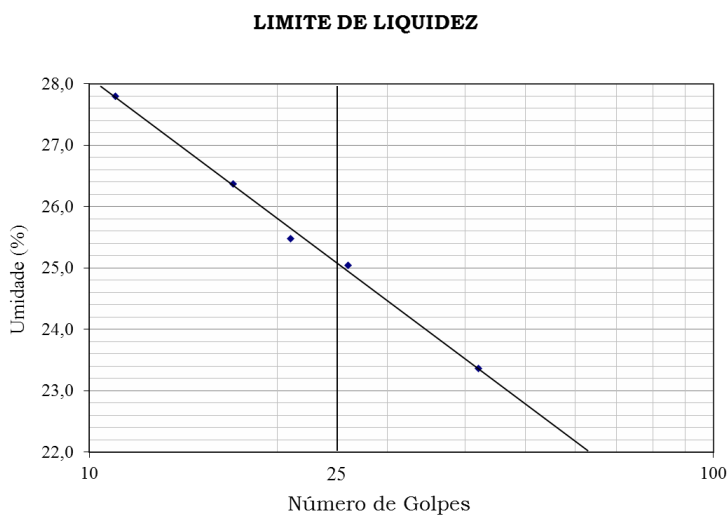
Figura 19 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: Acervo do autor.

Como se observa na Figura 19, o solo apresenta 60% de areia, 13% de silte e 27% de argila. A distribuição granulométrica obtida é similar a outros trabalhos que utilizavam o solo da região (DA COSTA, 2005; RODRIGUES, 2003; YACOUB, 2017).

Com relação aos índices de consistência, o solo apresentou um limite de liquidez 25,1% e um limite de plasticidade de 16,1% (Figura 20 e Tabela 3, respectivamente). Essas características são compatíveis com um solo arenoso fino e com baixa plasticidade.

Figura 20 - Ensaio de limite de liquidez.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Dados do limite de plasticidade.

| Cápsula Nº | P37 | P88 | P81 |
|-------------------------------|-------|--------------|-------|
| S + A + T (g) | 18,99 | 12,12 | 14,07 |
| S + T (g) | 18,33 | 11,48 | 13,36 |
| Água (g) | 0,66 | 0,64 | 0,71 |
| Solo (g) | 4,11 | 4,00 | 4,35 |
| Tara (g) | 14,22 | 7,48 | 9,01 |
| Umidade % | 16,1 | 16,0 | 16,3 |
| Limite de Plasticidade | | 16,1% | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

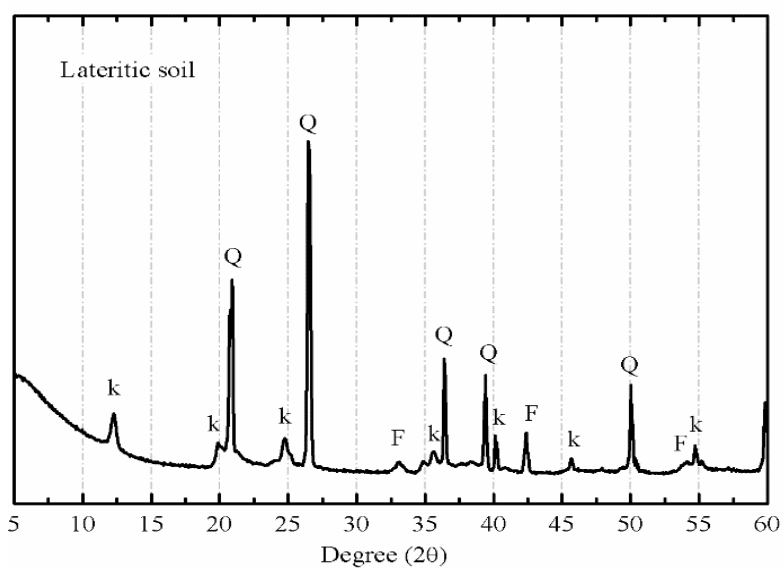
Além dos ensaios de caracterização de solos, foram realizados a determinação da composição química do material e a determinação da mineralogia do mesmo. A Tabela 4 mostra a composição química do solo em estudo, em forma de óxidos.

Tabela 4 - Composição química do Solo (% óxidos).

| óxidos | (%) |
|------------------------------------|-------|
| Al₂O₃ | 23,92 |
| SiO₂ | 56,46 |
| P₂O₅ | 0,02 |
| SO₃ | 0,05 |
| K₂O | 0,11 |
| CaO | 0,02 |
| TiO₂ | 3,15 |
| Cr₂O₃ | 0,06 |
| MnO | 0,05 |
| Fe₂O₃ | 11,30 |
| ZrO₂ | 0,15 |
| Nb₂O₅ | 0,01 |
| PF | 4,70 |

Fonte: Acervo do autor.

Na Figura 21 é apresentado o difratograma de raio-X da amostra de solo. Observa-se a presença de fases cristalinas no material representados pela presença de picos no difratograma. A fase cristalina predominantemente encontrada é o quartzo. Isso justifica a presença de 60% de areia na composição granulométrica do material. Do mesmo modo, a presença de feldspato (letra “F”) e caolinita (letra “k”).

Figura 21 - Difratograma de raio-X da amostra de solo.

Fonte: Acervo do autor.

5.1.2 Resíduo cerâmico

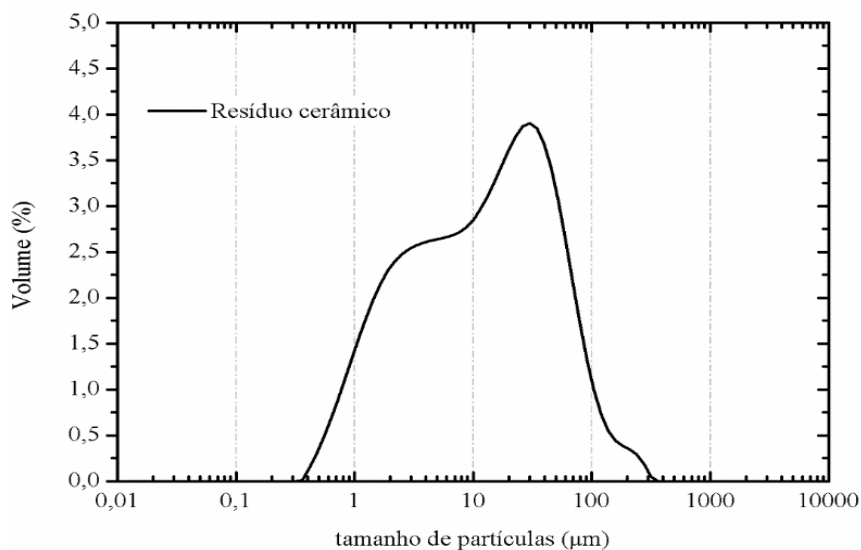
Na Tabela 5 é mostrada a composição química do resíduo cerâmico. O material está fundamentalmente composto de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O e CaO .

Tabela 5 – Composição química do resíduo cerâmico.

| óxidos | (%) |
|---|------------|
| Al_2O_3 | 19,41 |
| SiO_2 | 56,48 |
| P_2O_5 | 0,21 |
| SO_3 | 1,41 |
| K_2O | 4,46 |
| CaO | 4,61 |
| TiO_2 | 0,8 |
| Cr_2O_3 | 0,02 |
| MnO | 0,08 |
| Fe_2O_3 | 6,26 |
| Na_2O | 0,33 |
| MgO | 4,2 |
| outros | 1,73 |
| PF | 1,47 |

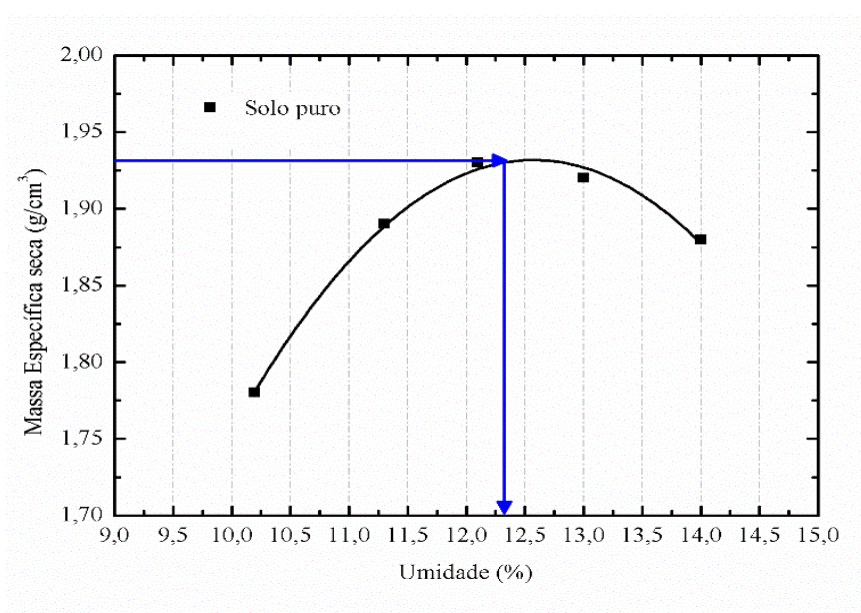
Fonte: Elaborado pelo autor.

A presença de SiO_2 e Al_2O_3 é um indicativo de que o resíduo cerâmico possa apresentar reatividade pozolânica. Com relação a finura do material, a Figura 22 mostra a distribuição granulométrica do resíduo cerâmico obtida por difração laser. Os parâmetros obtidos no ensaio indicam $d(0,9) = 57,728 \mu\text{m}$, $d(0,5) = 11,889 \mu\text{m}$ e $d(0,1) = 1,415 \mu\text{m}$.

Figura 22 - Granulometria do resíduo cerâmico.

Fonte: Acervo do autor.

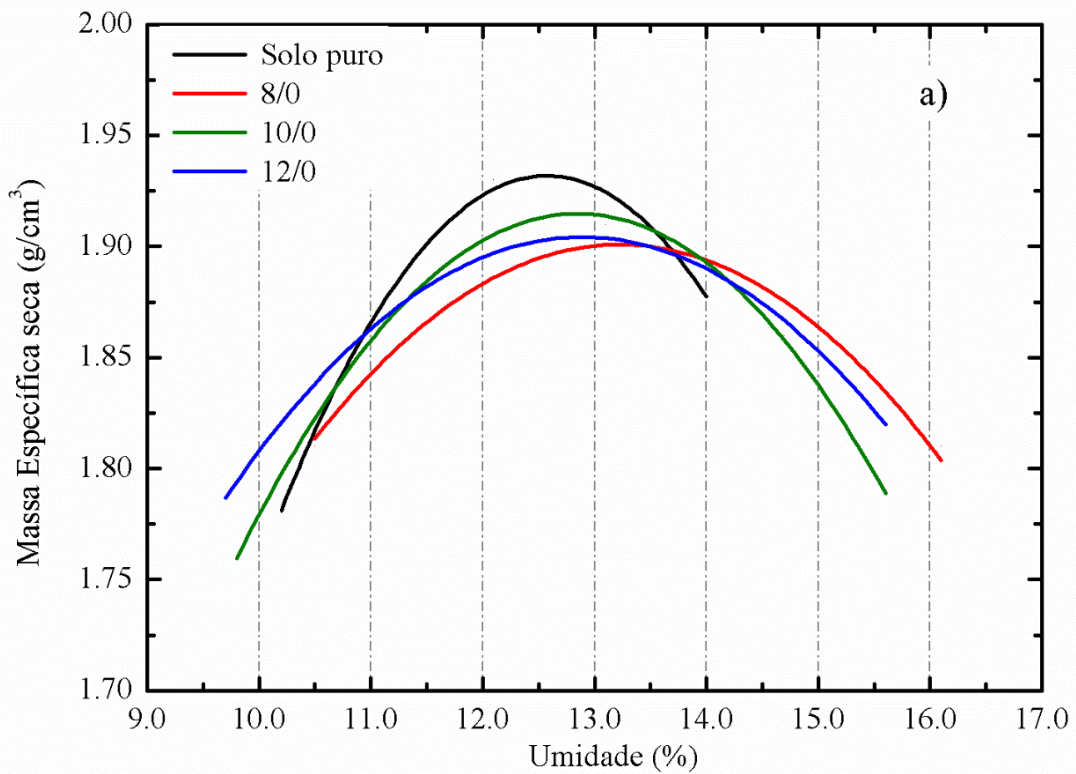
No que se refere a mineralogia, pode-se observar na Figura 23 a presença de picos característicos do mineral quartzo. Em outros estudos realizados, também foi detectado a presença do quartzo em resíduos cerâmicos (GONÇALVES FILHO; FAIRBAIRN, 2006; SALES, 2014; VIANA; VELASCO; SILVOSO, 2016). Também é possível identificar um suave desvio da linha base entre 15-35^o, indicando a presença de fases amorfas no material. Diante deste fato, e levando em consideração que o resíduo cerâmico em estudo apresenta uma finura elevada, acredita-se que o material possa contribuir com o processo de estabilização do solo já que além do efeito físico (preenchimento de vazios) pode existir uma efeito químico causado pela reação entre o resíduo cerâmico e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, ou seja, devido a reação pozolânica.

Figura 24 - Curva de compactação para solo puro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na continuação, a Figura 25 apresenta as curvas de compactação obtidas para as diferentes misturas estudadas.

Figura 25 - Curvas de compactação para as diferentes misturas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado, todas as curvas de compactação das misturas estudadas são bastante similares. A única curva diferente é a curva do solo puro. Portanto, no estudo optou-se por utilizar um único valor de massa específica aparente seca máxima e de umidade para todas as misturas. O valor adotado foi obtido através da média aritmética de todos os valores encontrados. Portanto, o valor adotado foi de massa específica aparente seca máxima = $1,915 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima = 13,0%.

Esses valores são os que foram utilizados para a moldagens dos corpos de prova para avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas.

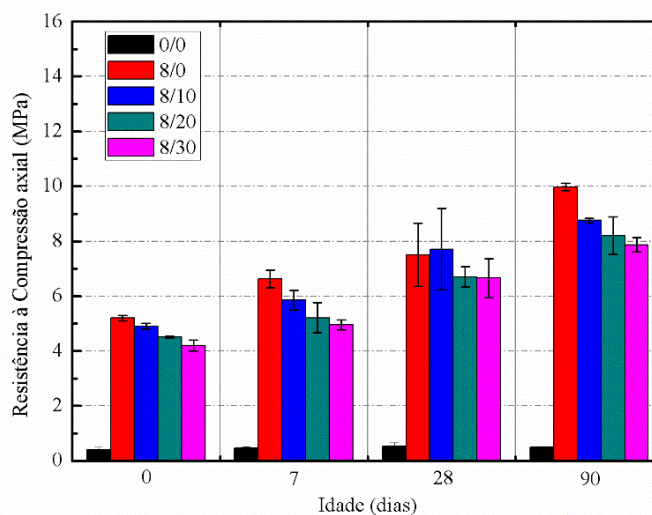
5.3 Resistência à compressão

Neste item, serão mostrados os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova para diferentes porcentagens de misturas e diferentes idades de cura.

A Figura 26, 27 e 28 mostram os valores médios das resistências à compressão e o desvio padrão para as porcentagens: 0% (controle), 8%, 10% e 12%. Como visto no item 4.2.3, neste estudo o cimento é o material aglomerante responsável por conferir resistência à compressão ao solo. Como pode ser observado, o controle apresenta uma resistência à compressão axial de 0,45 MPa. Como era de se esperar, este valor não varia com a idade de cura, já que os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida.

Ao adicionar cimento Portland a mistura, observa-se um aumento significativo na propriedade mecânica e, à medida que se incrementa a quantidade de cimento, maior é a resistência alcançando valores de 13 MPa para a mistura 12/0 após 90 dias de cura. É importante mencionar também que para as misturas com cimento, se observa um aumento da resistência ao aumentar a idade de cura. Isto é devido ao processo de hidratação do cimento Portland.

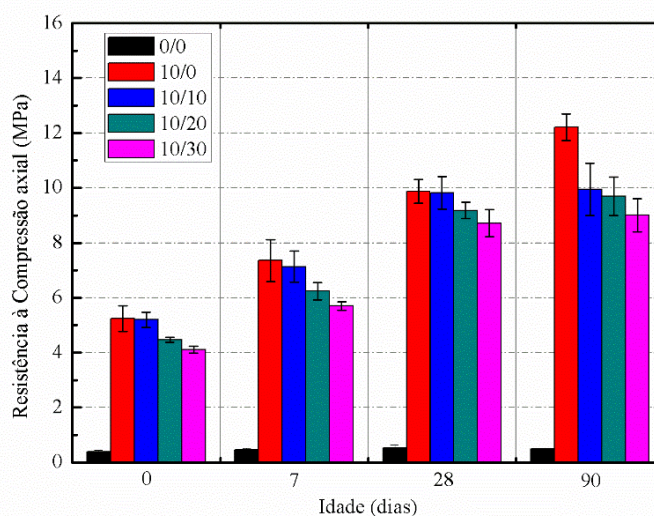
Figura 26 – Resistência à compressão para amostras com porcentagem de 8%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

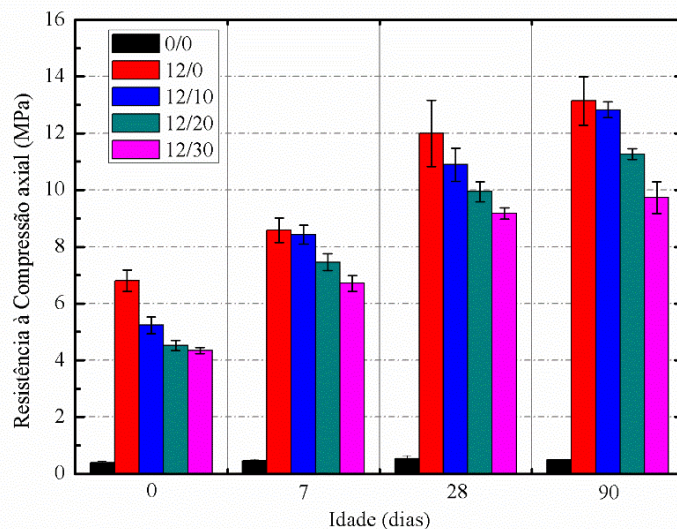
Com relação as misturas com resíduo cerâmico, observa-se que, no melhor dos casos, a mistura com resíduo cerâmico alcançou o valor de resistência à compressão do seu respectivo controle. Isso se deve, principalmente, a dois fatores: 1) reduzindo-se a quantidade de cimento Portland, espera-se uma redução na propriedade mecânica do material; 2) o resíduo cerâmico não apresenta elevada reação pozolânica, já que para alguns materiais pode-se alcançar valores superiores de resistência mecânica.

Figura 27 – Resistência à compressão para amostras com porcentagem de 10%.



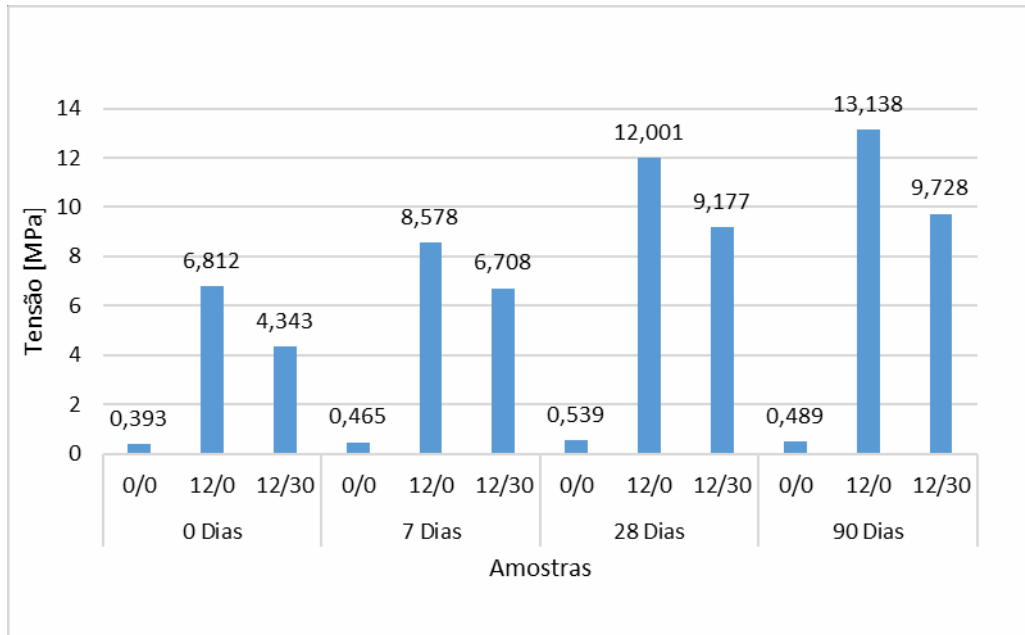
Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator que merece atenção é o fato de que os valores de resistência à compressão das misturas praticamente não são influenciados pela porcentagem de resíduo cerâmico utilizado. Apenas para as idades de 28 e 90 dias de cura as misturas com 12% de aglomerante mostram diferenças nos valores de resistência. Isto se deve ao fato de que estas misturas são as que apresentam a menor porosidade, devido a maior porcentagem de resíduo e, portanto, o efeito da formação de produtos hidratados devido a reação pozolânica pode ser notado.

Figura 28 – Resistência à compressão para amostras com porcentagem de 12%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 29 compara os resultados do solo puro (controle) com a maior porcentagem de cimento e a maior porcentagem de resíduo cerâmico, para quatro idades diferentes. Como primeira análise, nota-se que para as misturas com cimento houve aumento da resistência à compressão conforme há o aumento da idade de cura. Já para o controle, a resistência permaneceu a mesma com o aumento da idade de cura, pois não há reação química para se completar com o passar do tempo. Já para as misturas de solo/cimento e solo/cimento/resíduo, a resistência aumenta até os 28 dias de cura, devido a reação química do cimento, já que o valor de ganho de resistência se mantém igual ou pouco superior para as substituições estudadas em 90 dias de cura.

Figura 29 – Comparativo entre porcentagens e tempo de cura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 ENSAIOS DE CONTRAÇÃO E EXPANSÃO

Com os dados da realização dos ensaios de contração e expansão, foram utilizadas as equações 1 e 2 para tratamento dos mesmos, sendo possível obter a contração e a contração máxima de cada mistura. Nas Tabelas 7, 8 e 9 abaixo estão as médias dos resultados obtidos para cada porcentagem de mistura.

Não foi encontrado nas literaturas consultadas nenhum valor limite de expansão máxima de camadas compactadas. Nogami e Villibor (1995) apresentam uma classificação de expansão para fins de pavimentação. Os valores limites desta classificação foram obtidos em ensaios de mini-CBR realizados em solos lateríticos, mostrado na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Valores limites de expansão

| | | |
|---------------------------|---------|-------------|
| EXPANSÃO/CONTRAÇÃO | Elevada | > 3 % |
| | Média | 0,5 % a 3 % |
| | Baixa | < 0,5 % |

Fonte: (DA COSTA, 2005).

Na tabela 7, 8, 9 e 10 verifica-se que o maior valor de contração/expansão obtido foi para o solo puro de 0,39%, mostrando que os valores obtidos classificam as misturas como de baixo comportamento expansivo, conforme o critério representado pela Tabela 6.

Tabela 7 – Médias Solo Puro e Solo-Cimento (8,10 e 12%)

| MIST. | DIAMETRAL | | AXIAL | |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Contr. Máxima (%) | Contração (%) | Contr. Máxima (%) | Contração (%) |
| 0/0 | 0,39 | 0,25 | 0,36 | 0,32 |
| 8/0 | 0,30 | 0,29 | 0,32 | 0,29 |
| 10/0 | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,35 |
| 12/0 | 0,273 | 0,267 | 0,313 | 0,313 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Médias Solo-Cimento (8%) com Resíduo Cerâmico

| MIST. | DIAMETRAL | | AXIAL | |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Contr. Máxima (%) | Contração (%) | Contr. Máxima (%) | Contração (%) |
| 8/10 | 0,32 | 0,29 | 0,36 | 0,36 |
| 8/20 | 0,36 | 0,35 | 0,38 | 0,39 |
| 8/30 | 0,27 | 0,27 | 0,37 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Médias Solo-Cimento (10%) com Resíduo Cerâmico

| MIST. | DIAMETRAL | | AXIAL | |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Contr. Máxima (%) | Contração (%) | Contr. Máxima (%) | Contração (%) |
| 10/10 | 0,287 | 0,287 | 0,283 | 0,283 |
| 10/20 | 0,340 | 0,330 | 0,323 | 0,320 |
| 10/30 | 0,293 | 0,293 | 0,360 | 0,350 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Médias Solo-Cimento (12%) com Resíduo Cerâmico

| MIST. | DIAMETRAL | | AXIAL | |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Contr. Máxima (%) | Contração (%) | Contr. Máxima (%) | Contração (%) |
| 12/10 | 0,317 | 0,317 | 0,300 | 0,300 |
| 12/20 | 0,297 | 0,247 | 0,280 | 0,233 |
| 12/30 | 0,327 | 0,297 | 0,327 | 0,313 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos resultados obtidos, pode-se observar que as variações volumétricas predominantes foram as contrações. É possível notar que nas amostras coletadas há uma diferença entre os valores axiais e diametraes, que segundo Da Costa (2005), ocorre devido a superfície de contato exposta ao ar livre é diferente nos ensaios diametraes e axiais, resultando em ensaios com valores diferentes.

Com a análise das médias, é possível notar que ocorre a maior contração máxima diametral dentre as amostras analisadas no solo puro, mas quando se trata da análise da contração diametral apresentada no período analisado a média é uma das menores apresentadas, mostrando uma maior susceptibilidade do solo puro a variação volumétrica (mesmo que em um número pequeno de amostras). Essa diferença corresponde a 56% nos valores de contração diametral, e 11,5% nas contrações axiais do solo puro (0/0).

Já quando se é comparado as médias das contrações máximas (entre amostras axiais e diametraes), observa-se que a maior diferença se encontra na mistura 8/30, apresentando 37% de diferença.

Por sua vez, a maior diferença entre contração axial máxima e contração axial ocorreu na amostra 12/20. A diferença fica em torno 20%, pouco acima do solo puro que é a segunda maior para este caso.

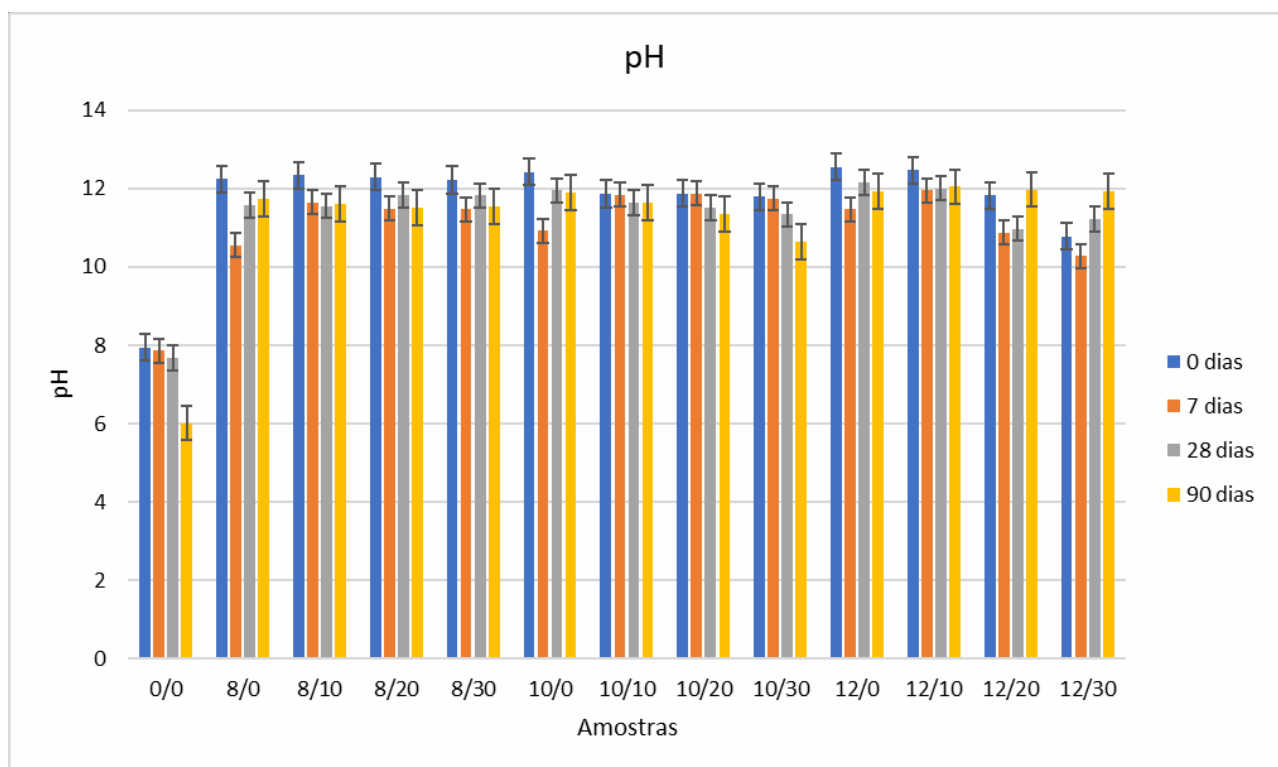
A partir da análise dos resultados, destaca-se a maior variação entre valores ocorrendo no solo puro, ou seja, na mistura com cimento e na mistura com cimento e resíduo cerâmico houve uma diminuição das variações entre os valores, podendo assim assegurar maior estabilidade a mistura nos resultados até aqui apresentados.

5.5 MEDIDAS DE PH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

As medidas de pH e condutividade elétrica foram realizadas com o objetivo de avaliar a reação pozolânica (reação entre o resíduo cerâmico e o hidróxido de cálcio). Esta reação consome íons Ca^{+2} , OH^- e, portanto, as medidas de pH e condutividade elétrica são medidas indiretas de verificar o progresso dessa reação.

Na Figura 30 são mostrados os valores de pH obtidos para todas as misturas estudadas. Em geral, não se observam variações significativas nos valores obtidos. A única diferença encontrada é nos valores do solo puro já que neste caso a presença de OH^- deve ser menor e, portanto, o valor do pH é menor que para as amostras com cimento Portland.

Figura 30 - Valores de pH para as misturas estudadas.

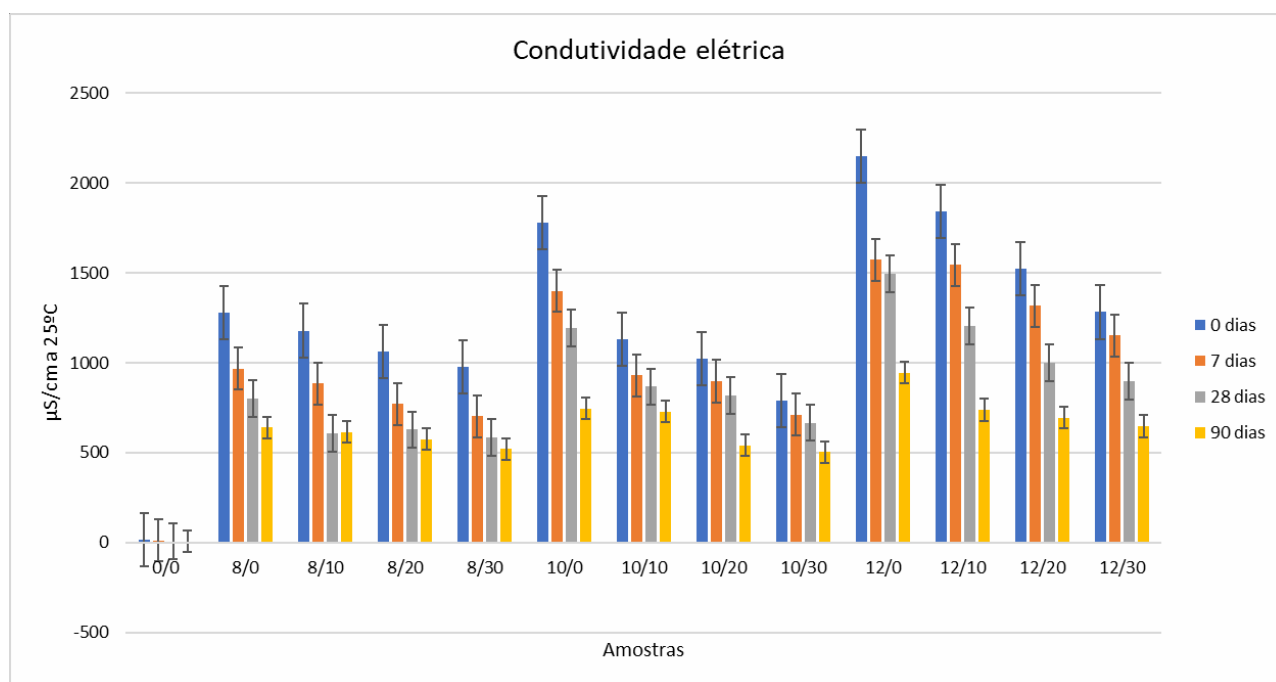


Fonte: Elaborado pelo autor.

Do mesmo modo, foram medidos os valores de condutividade elétrica das misturas (Figura 31). Neste caso, se observam variações significativas entre as misturas. Para a idade de 0 dias, ou seja, a medida foi realizada no mesmo dia da moldagem, observa-se que a medida que se aumenta a porcentagem de cimento Portland, os valores de condutividade aumentam, alcançando valores superiores a 2000 S.cm^{-1} para a mistura 12/0. A medida

que cimento se hidrata, formando produtos que geram resistência mecânica a mistura, os íons vão se combinando quimicamente e, como consequência, se observa uma redução nos valores de condutividade elétrica. Para o caso da mistura 12/0, tem-se aproximadamente 2100 S.cm^{-1} a 0 dias e 900 S.cm^{-1} para a idade de 90 dias de cura. Em geral, também pode ser observado que para as misturas com resíduo cerâmico, os valores de condutividade elétrica são inferiores aos seus respectivos padrões (amostra sem resíduo cerâmico). Isso é um indicativo de que o resíduo cerâmico está reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio, reduzindo assim, a presença de íons livres na mistura. Estudos com a mesma ideia foram realizados por Tashima et al. (2013), onde também foi detectado variações nas medidas de condutividade elétrica para aglomerantes ativados alcalinamente.

Figura 31 - Valores de condutividade elétrica para as misturas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

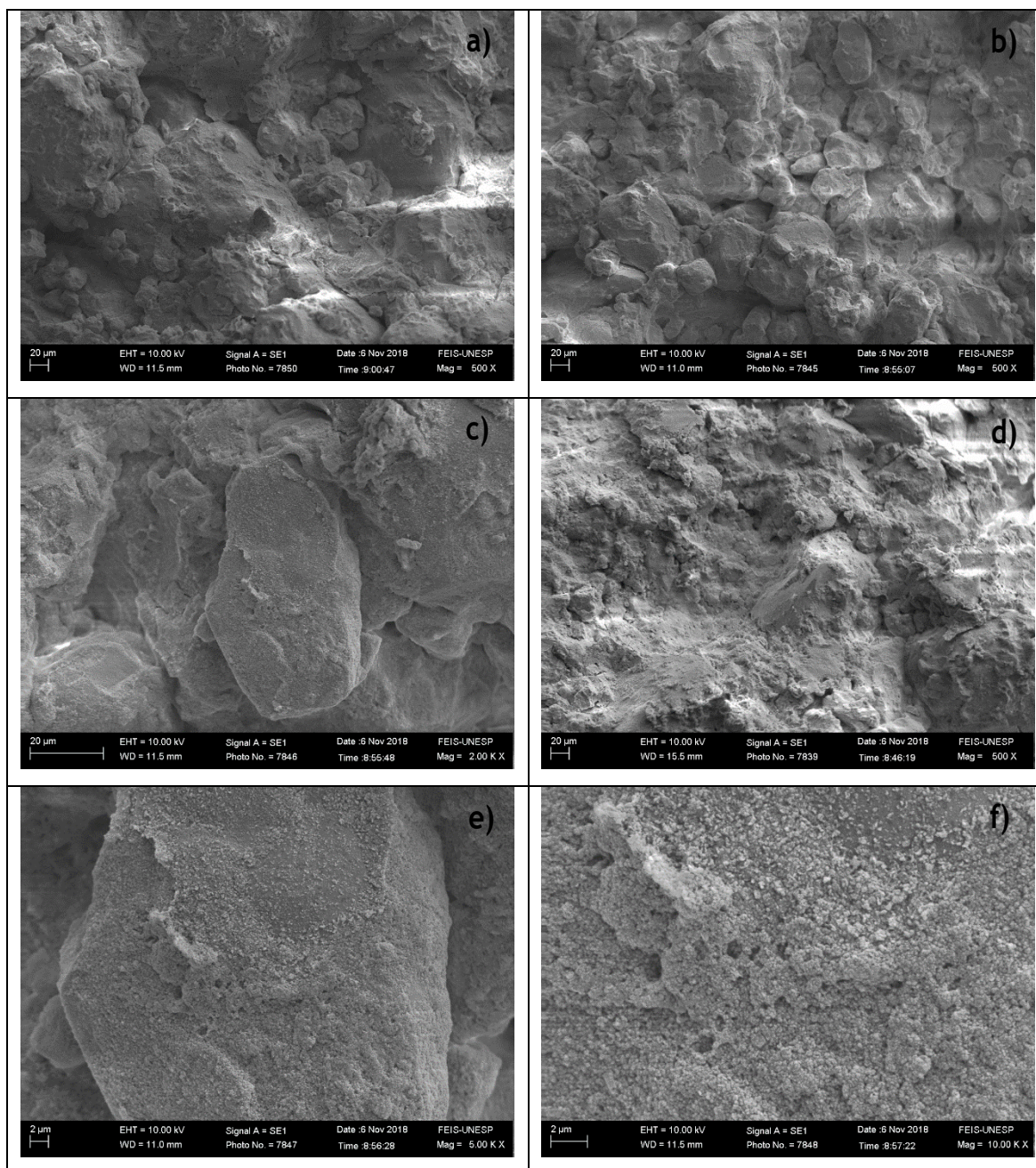
5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O MEV foi utilizado para analisar a microestrutura do solo (0/0) e das misturas de solo, cimento e resíduo cerâmico (12/0 e 12/30), todos com idade de 28 dias.

Os resultados obtidos estão nas Figuras 32, 33 e 34. Na Figura 32, pode-se perceber uma estrutura floculada, típica de amostras de solo puro (Figuras 32a, 32b, 32c e 32d). Na Figura

32e se observa em detalhe uma partícula de quartzo (areia). A superfície do grão apresenta uma superfície rugosa, cujo detalhe é observado na Figura 32f. Provavelmente, essa rugosidade se deve a presença de partículas finas, principalmente argilas, aderidas à superfície do grão de areia.

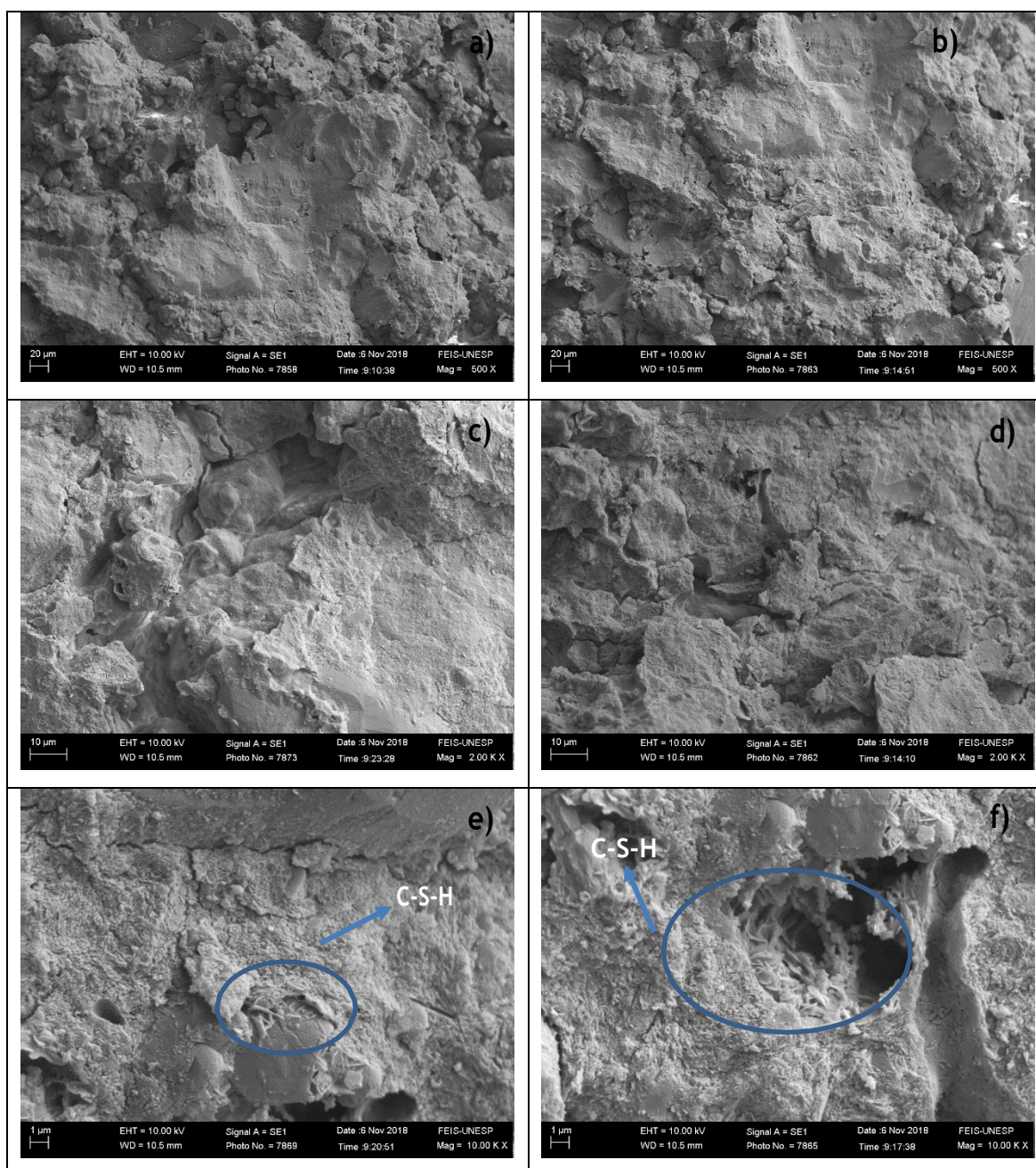
Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura do solo puro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 33 se observa uma estrutura bastante diferente da estrutura do solo puro. Neste caso, a estrutura apresenta uma cimentação devido a presença de cimento Portland na mistura. Os produtos de hidratação do cimento Portland, em especial os géis C-S-H são os responsáveis pela formação dessa estrutura mais densa e compacta que envolvem as partículas de solo (Figuras 33a, 33b, 33c e 33d).

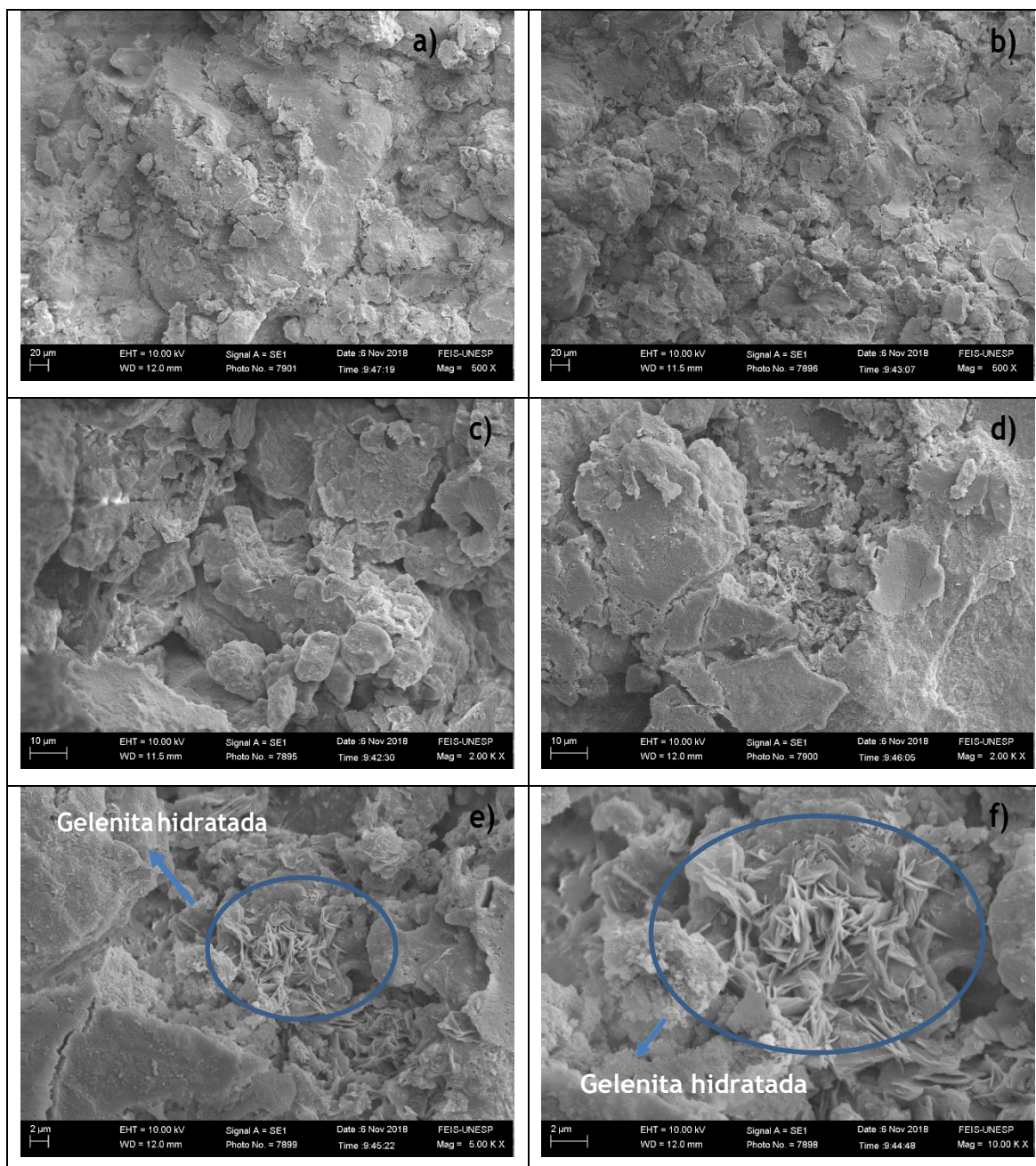
Figura 33 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 12/0.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Figuras 33e e Figura 33f se observa a formação de alguma estrutura cristalina, seguramente um C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Essa estrutura mais densa confirma os resultados mecânicos obtidos, mostrando a significativa melhora do solo quando tratado com cimento Portland. Não foi observado a presença de cristais de hidróxido de cálcio na mistura.

Figura 34 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 12/30.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 mostra a microestrutura da mistura 12/30. Neste caso, tem-se a presença de solo, cimento Portland e resíduo cerâmico. Similar a amostra 12/0, a mistura 12/30 apresenta uma estrutura compacta e densa devido a presença do aglomerante na mistura (figuras 34a, 34b, 34c e 34d). Não foi possível identificar a presença de partículas de resíduo cerâmico já que as mesmas apresentam morfologia irregular.

Entretanto, para as amostras 12/30 foi observado a presença de gellenita hidratada, provavelmente formada pela reação entre o hidróxido de cálcio e o resíduo cerâmico. A formação de gellenita hidratada está em consonância com o ensaio de pH e condutividade elétrica que mostra a redução nos valores de pH e, principalmente, de condutividade elétrica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusões, o resíduo cerâmico obtido a partir da moagem de produtos de descarte de olarias locais, demonstrou possuir características satisfatórias para substituir parcialmente o cimento Portland em estabilizações química de solos.

Os ensaios de caracterização mostram que o resíduo cerâmico apresenta uma alta proporção de SiO_2 e Al_2O_3 , indicando ser um material silicoaluminoso. Já no ensaio de Difração de Raio-X, o material apresentou características amorfas devido ao desvio da linha base, além da presença de quartzo (areia).

Nos ensaios de resistência à compressão, mesmo com a substituição parcial do cimento por resíduo, a resistência praticamente não se alterou e foi no mínimo 10 vezes superior a resistência do solo puro, sendo observado o aumento da resistência com o aumento da idade de cura, devido a reação do cimento.

Nos ensaios de contração/expansão, destaca-se a maior variação entre valores ocorrendo no solo puro, ou seja, na mistura com cimento e na mistura com cimento e resíduo cerâmico houve uma diminuição das variações entre os valores, podendo assim assegurar maior estabilidade a mistura nos resultados.

Os ensaios de pH e condutividade mostraram que a medida que se aumenta a porcentagem de cimento Portland, os valores de condutividade aumentam. A medida que cimento se hidrata, formando produtos que geram resistência mecânica a mistura, os íons vão se combinando quimicamente e, como consequência, se observa uma redução nos valores de condutividade elétrica. Também pode ser observado que para as misturas com resíduo cerâmico, os valores de condutividade elétrica são inferiores aos seus respectivos padrões, um indicativo de que o resíduo cerâmico está reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio, reduzindo a presença de íons livres na mistura.

Finalmente, nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura para o solo puro tem-se uma estrutura cristalina e floculada. Já nas misturas de solo, cimento e resíduo cerâmico vê-se uma estrutura densa e amorfa devido aos produtos hidratados formados.

Os resultados do estudo de substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico na estabilização química de solos colapsíveis mostrou resultados satisfatórios nos ensaios de resistência à compressão e expansão, resultados estes que foram confirmados pelos ensaios microestruturais e de pH e condutividade elétrica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA- ABCERAM. **Cerâmica no Brasil**. [S.l.], 2018. Normas Técnicas.

ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 1980. 115 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

AKASAKI, J. L.; SILVA, A. P. Estudo de composições do solo estabilizado com cal e resíduos agroindustriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco**. 2004. 224 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

ARAKI, M. S. Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal. 1997. 121 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio**. São Paulo: ABCP, 1986, 57 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6508**: grãos de solo que passam na peneira de 4,8 Mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984d.

AY, N.; ÜNAL, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 30, p. 497-499, 2000.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos utilizando cal. um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição da cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado)- Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

BARBOSA, N. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K. Construção com terra crua. In: TOLEDO FILHO, R.D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. (Ed.). **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap.4, p.113-144.

BARDEN, L.; MCGOWN, A.; COLLINS, K. The collapse mechanism in partly saturated soils. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 7, p. 49-60, 1973.

BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H. B.; MUNTOHAR, A. S. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 19, n. 6, p. 448-453, 2005.

BENATTI, J. C. B.; RODRIGUES, R. A.; MIGUEL, M. G. Aspects of mechanical behavior and modeling of a tropical unsaturated soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, Dordrecht, v. 31, n. 5, p. 1569-1585, 2013.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement Concrete Research**, v. 41, p. 750-763, 2011.

CHEN, L.; LIN, D. F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 162, p. 321-327, 2009.

CINTRA, J. C. A. Aplicações da mecânica dos solos não saturados: fundações em solos colapsíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5., 2004, São Carlos. **Anais...** São Carlos: [s.n.], 2004. v. 2, p. 575-593.

DA COSTA, O. P. **Avaliação de expansão, contração e resistência a compressão simples de barreiras selantes produzidas com solo laterítico estabilizado quimicamente**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"- UNESP, Ilha Solteira, 2005.

DALLACORT, R.; LIMA JUNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 511-518, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **ME 258/94**: solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro: DNER, [200-]. 16 p.

DUDLEY, J. H. Review of collapsing soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, Ann Arbor, v. 96, p. 925-947, 1970.

EELA. **Panorama da indústria cerâmica vermelha no Brasil**. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2012.

FARIAS FILHO, F.; TOLEDO FILHO, R. D.; RABELO, M. S. Incremento da durabilidade de compósitos reforçados com fibras vegetais através da substituição parcial do cimento portland por metacaolinita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001.

FEDA, J. Structural stability of subsident loess soil from praha-dejvice. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 1, n. 3, p. 201-219, 1966.

FERREIRA, R. L. S. **Identificação e disposição final dos resíduos sólidos gerados na fabricação de cerâmica vermelha no vale do Assú/RN**. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2012.

FERREIRA, R. C.; MONTEIRO, L. B.; PERES, J. E. E.; BENVENUTO, C. Some aspects on the behaviour of brazilian collapsible soils. In. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 1989. p. 117-120.

FREIRE, W. J. **Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento.** 1976. 142 f. Tese (Doutorado)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz- ESALQ, Universidade de São Paulo- USP, Piracicaba, 1976.

GALLUCCI, L.; CUNHA, R. D. Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos. **Revista Técnica ESPM. Estudos de Mercado SEBRAE**, 2008.

GIBBS, H. J.; BARA, J. P. Stability problems of collapsing soil. **Journal of the Soil Mechanics**, v. 93, n. SM4, p. 577-594, 1967.

GIDLEY, J. S.; SACK, W. A. Environmental aspects of waste utilization in construction. **Journal of Environmental Engineering**, Los Angeles, v. 110, n. 6, p. 1117-1133, 1984.

GONÇALVES, J. P.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94, out./dez. 2006.

Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-20.4282415,-51.3424331,363m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 15 mar2018.

GUTIERREZ, N. H. M.; NÓBREGA, M. M. T.; VILAR, O. M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Heidelberg, v. 68, n. 1, p. 107- 116, 2009.

INGLES, O. G., METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice.** [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1973. 384 p.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

ITAÚ. Enciclopédia Itaú Cultural de Artes Visuais. **Cerâmica:** definição. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.itaucultural.org.br>. > Acesso em: 5 dez. 2017.

KAWAHASHI, J. *et al.* Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação. **Transportes**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 5-16, 2010.

KREJCIRIKOVA, B., OTTOSEN, L.M., KIRKELUND, G.M., CARSTEN, R., PEUHKURI, R. Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar.

Journal of Building Engineering. Denmark, v.21, p. 396 – 403, 2019. LIN, D. F.; LIN, K. L.; HUNG, M. J.; LUO, H. L. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 145, p. 58-64, 2007.

MACÊDO, M. M. **Solos modificados com cimento:** efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. 2004. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

- MEDERO, G. M. **Comportamento de um solo colapsível artificialmente cimentado**. 2005. 319 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos**. [S.l.]: COPPE/UFRJ, 1987.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos**. Rio de Janeiro: Escola de Engenharia- UFRJ, 2004.
- MILLER, G. A.; AZAD, S. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 14, n. 2, p. 89-97, 2000.
- NETCERAMICS. **Informações técnicas: processo de fabricação**. [S.l.: s.n.,]: 2009a. Acesso em: 20 dez. 2015.
- NUÑES, E. Suelos especiales: colapsibles, expansivos, preconsolidados por desecación. In: CONGRESO PAN-AMERICANO DE MECÁNICA DOS SUELOS E INGENIERÍA DE FUNDACIONES, 5., Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: [s.n.], 1975. v. 4, p. 43-73.
- OYELAMI, C. A.; VAN ROOY, J. L. A Review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in africa: a geological perspective. **Journal of African Earth Sciences**, v. 119, p. 226-237, 2016.
- PEETHAMPARAN, S.; OLEK, J.; LOVELL, J. Influence of chemical and physical characteristic of cement kiln dusts (CKDS) on their hydration behavior and potential suitability for soil stabilization. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 8, p. 2008-15,
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 1999.
- PRASARA-A, J.; GHEEWALA, S. H. Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review. **Journal of Cleaner Production**. Thailand, v.167, p. 1020 -1028, 2017.
- RODRIGUES, R. A. **A influência do esgoto doméstico como fluido de saturação no colapso de um solo arenoso**. 2003. 115 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2003.
- RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão do lençol freático**. 2007. 262 f. Tese (Doutorado)– Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2007.
- RODRIGUES, R. A.; LOLLO, J. A. Influence of domestic sewage leakage on the collapse of tropical soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Heidelberg, v. 66, p. 215-223, 2007.
- ROLIM, M. M.; FREIRE, W. J. Resistência à compressão de tijolos fabricados com solo-vinhaça concentrada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 3, p.1-8, 1998.

- SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland.** 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG, 2014.
- SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. Estabilização dos solos com cal e betume. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 6., 1995, Santos. **Reunião...** Santos: [s.n.], 1995. p. 74 – 97.
- SARGENT, P.; HUGHES, P. N.; ROUAINIA, M.; WHITE, M. L. The use of alkaliactivated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. **Engineering Geology**, v. 152, p. 96-108, 2012.
- SENHADJI, Y.; ESCADEILLAS, G.; MOULI, M.; KHELAFI, H.; BENOSMAN. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. **Powder Technology**, v. 254, p. 314-323, 2014.
- SHARP, J. H.; GARTNER, E. M.; MACPHEE, D. E. Novel cement systems (sustainability). **Advances in Cement Research**, London, v. 22, n. 4, p. 195-202, 2010.
- SIDDIQUE, S., SANDEEP, C., SANDEEP, S., TRILOK, G. Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions. **Journal of Cleaner Production**, India, v. 210, p. 246 – 255, 2019.
- SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** 2007. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro- COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V. Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): influence of SiO₂/Na₂O and H₂O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure. **Fuel**, v. 108, p. 833-839, 2013.
- TASHIMA, M. M.; SORIANO, L. ; MONZÓ, J. ; BORRACHERO, M. V.; AKASAKI, J. L.; PAYÁ, J. Nuevo método para evaluar la reactividad puzolánica de adiciones minerales por medio de medidas de pH y conductividad eléctrica en suspensiones cal: puzolana. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 64, p. e032, 2014.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.
- VIANA, L. S.; VELASCO, R. V.; SILVOSO, M. M. Argamassas e concretos com a adição de resíduos cerâmicos e de rochas ornamentais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, Rio de Janeiro. **Encontro...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, 2016.
- VILAR, O. M.; RODRIGUES, J. E.; NOGUEIRA, J. B. Solos colapsáveis: um problema para a engenharia de solos tropicais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 1981. v. 1, p. 209-224.
- VILLIBOR, D. F; NOGAMI, J. **Pavimentos econômicos:** tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2009.

VOGT, J. C. Estabilização betuminosa. In: SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 7., 1971, Rio de Janeiro. **Simpósio...** Rio de Janeiro: [s.n.], 1971.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT- WSCSD. **Cement industry energy and co₂ performance: getting numbers right.** [S.l.: s.n.],2009.

ZHANG, M.; GUO, H.; EL-KORCHI T.; ZHANG, G.; TAO, M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next: generation soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 47, p. 1468-1478, 2013.