

RAFAEL PACHECO EVANGELISTA

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE ALUMINA EM  
MASSA DE SOLO-CIMENTO**

SALVADOR-BA  
2023

RAFAEL PACHECO EVANGELISTA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE ALUMINA EM MASSA DE  
SOLO-CIMENTO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mirtânia Antunes Leão  
Coorientador: Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma

SALVADOR-BA  
2023

Biblioteca Raul V. Seixas – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA - Salvador/BA.

E923i Evangelista, Rafael Pacheco.

Influência da adição de resíduos de alumina em massa de solo-cimento / Rafael Pacheco Evangelista. Salvador, 2023.

79 f. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mirtânia Antunes Leão.

Coorientador: Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma.

1. Solo-cimento. 2. Cimento. 3. Resíduos de alumina. 4. Compósitos cerâmicos. 5. Materiais de construção civil. I. Leão, Mirtânia Antunes. II. Palma, Aldemiro José Rocha. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. IV. Título.

CDU 2 ed. 666.952

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

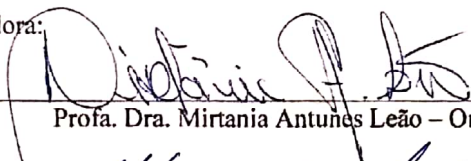
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE ALUMINA EM MASSA DE SOLO  
CIMENTO

Rafael Pacheco Evangelista

Produto (s) Gerado (s): **Relatório Técnico**

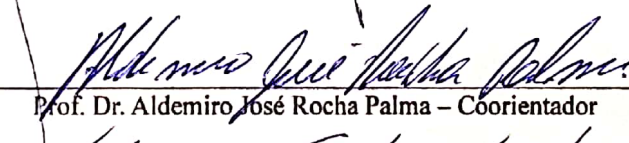
Orientadora: Profa Dra. Mirtania Antunes Leão

Banca examinadora:



---

Profa. Dra. Mirtania Antunes Leão – Orientadora



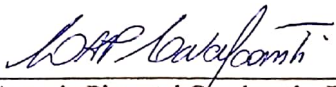
---

Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma – Coorientador



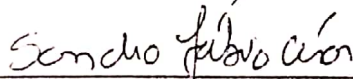
---

Prof. Dr. Adriano Silva Fortes – Examinador IFBA



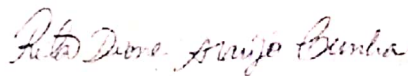
---

Prof. Dr. Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti – Examinador IFBA



---

Prof. Dr. Sandro Fábio César – Examinador Externo UFBA



---

Profa. Dra. Rita Dione Araujo Cunha – Examinadora Externa UFBA

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 03/01//2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido a vida.

Agradeço em seguida a meus pais, por todo amor que sempre me deram, e por terem sempre me incentivado em meus estudos.

Também agradeço a todos que me apoiaram e se envolveram direta e indiretamente na execução deste projeto:

À minha orientadora, Dr<sup>a</sup>. Mirtânia Antunes Leão, por sua orientação e incentivo nos trabalhos desde a época de minha graduação, e por tratar tão bem a todos de seu grupo de pesquisa;

Ao meu coorientador, Dr. Aldemiro José Rocha Palma, por toda a ajuda dada no desenvolvimento deste trabalho, especialmente com a aquisição de parte dos materiais utilizados;

Aos meus colegas do Grupo de Pesquisa em Compósitos Poliméricos e Cerâmicas pelo apoio dado sempre que necessário, especialmente aos colegas Carlos Alberto França Jr., por ter me ajudado a adquirir o residuo e o solo argiloso utilizado na pesquisa, e Carla Tainara de Oliveira Lima, que me ajudou na confecção dos corpos de prova;

A Natália Santos, da empresa Biobloc, por ter cedido parte do material utilizado na confecção dos corpos de prova e por ter esclarecido o processo de fabricação de tijolos de solo-cimento em sua empresa;

Aos técnicos e demais colaboradores do Departamento Acadêmico de Tecnologia Mecânica (DATM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), especialmente a Carina Soares do Nascimento pela ajuda com as microscopias eletrônicas de varredura, e Iuri Martins Campos por ajudar na realização dos ensaios de compressão;

Aos professores Dr. Adriano Silva Fortes, MSc. Virgínia Silva Neves, Dr. Jenner Miranda de Carvalho e Eng<sup>a</sup>. Lettycia Pinheiro, do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACCIVIL) do IFBA, por terem permitido o uso de seus laboratórios e por terem tirado algumas dúvidas que surgiram ao longo do trabalho;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e ao IFBA, pela bolsa concedida em meu último semestre de mestrado, que foi muito importante na reta final do curso;

Ao professor Dr. Luiz Antônio Pimentel Cavalcanti, por ter sido sempre muito solícito e ter atendido prontamente às demandas referentes às matrículas a cada semestre e à bolsa da FAPESB;

Aos professores Dr. Sandro Fábio César e Dr<sup>a</sup> Rita Dione Araujo Cunha, da Universidade Federal da Bahia (UFBA), além dos demais membros da banca já citados anteriormente, pela participação na banca avaliadora e pelas sugestões dadas para o trabalho final aqui apresentado;

E agradeço finalmente a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do IFBA, por serem os grandes responsáveis pela existência do programa.

## RESUMO

Os materiais de construção civil podem ser usados como destinação alternativa para resíduos, evitando que estes sejam descartados de forma inadequada. O solo-cimento é um material de construção que pode ser usado para isso, e que ainda apresenta a vantagem de ser fabricado sem o processo de queima usado em blocos e tijolos de cerâmicas convencionais, cujo processo de fabricação por sinterização é altamente poluente e grande consumidor de energia. A alumina ativada é utilizada como adsorvente para a purificação de poliolefinas e, após seu uso, este material se torna um resíduo que pode ser indicado para substituir parcialmente o solo empregado em massas de solo-cimento. A adição de outros resíduos sólidos em formulações de solo-cimento tem sido estudada no Brasil, especialmente para a confecção de blocos e tijolos ecológicos. Por estes motivos, este trabalho investigou como o resíduo de leite adsorvente feito de alumina pode interagir com as substâncias presentes no cimento e no solo usado em formulações típicas de massas para a fabricação de blocos e tijolos de solo-cimento. Para isso, primeiramente, foi feito um estudo em dois solos diferentes, para verificar suas adequações às normas brasileiras (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os corpos de prova foram fabricados em quatro composições diferentes, sendo uma sem acréscimo de resíduo, e as demais com a substituição do solo por 5%, 10% e 15% (em volume) de resíduo. O resíduo foi caracterizado quimicamente através de fluorescência de raios-X, e a microestrutura do solo-cimento utilizado nos corpos de prova foi analisada por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que o acréscimo de resíduo de alumina reduz a resistência à compressão do solo-cimento, levando-a para valores abaixo do mínimo exigido pelas NBR 10834 e NBR 8491, enquanto reduz o teor de absorção de água do material, sendo que todas as composições atenderam ao mínimo exigido pela mesma norma. Observando-se as microestruturas presentes nas microscopias eletrônicas, chegou-se à conclusão que a redução da resistência à compressão é devido à baixa adesão dos resíduos de alumina à matriz de solo-cimento, enquanto que a redução do teor de absorção de água se deu pela baixa porosidade do resíduo, muito menor que a da matriz. Dessa forma, fica evidenciado que o resíduo de alumina é promissor como substituto parcial do solo no preparo de massas para a produção de blocos e tijolos de solo-cimento, reduzindo o passivo ambiental deste resíduo através de seu reaproveitamento. Porém, ainda é necessário investigar quais medidas podem melhorar a resistência à compressão do material, como o uso de cimentos de classes de resistência maiores, de acordo com a classificação da NBR 16697.

**Palavras-chave:** solo-cimento, cimento, resíduos de alumina, compósitos cerâmicos, materiais de construção civil.

## ABSTRACT

Construction materials can be used as an alternative destination for waste, preventing them from being disposed improperly. Soil-cement is a building material that can be used for this, and that also has the advantage of being manufactured without the firing process used in conventional ceramic blocks and bricks, whose manufacturing process by sintering is highly polluting and consumes much energy. Activated alumina is used as an adsorbent for the purification of polyolefins and, after its use, this material becomes a residue that can be indicated to partially replace the soil used in soil-cement admixtures. The addition of other solid waste in soil-cement formulations has been studied in Brazil, especially for the manufacture of ecological blocks and bricks. For these reasons, this work investigated how the adsorbent residue made of alumina can interact with substances present in the cement and soil used in typical formulations of admixtures for the manufacture of soil-cement blocks and bricks. For this, firstly, a study was carried out in two different soils, to verify their suitability to the Brazilian standards (NBR) of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The specimens were manufactured in four different compositions, one without addition of residue, and the others with the replacement of the soil by 5%, 10% and 15% (by volume) of residue. The residue was chemically characterized by X-ray fluorescence and the microstructure of the soil-cement from the specimens was analyzed by scanning electron microscopy. The results showed that the addition of alumina residue reduces the compressive strength of the soil-cement, taking it to values below the minimum required by NBR 10834 and NBR 8491, while reducing the water absorption content of the material (and all compositions met the minimum required by the same standard). Observing the microstructure present in the electronic microscopies, it was concluded that the reduction in compressive strength is due to the low adhesion of the alumina residues to the soil-cement matrix, while the reduction in the water absorption content was due to the low porosity of the residue, much smaller than that of the matrix. Therefore, alumina residue is promising as a partial substitute for soil in the preparation of masses for the production of soil-cement blocks and bricks, reducing its negative environmental impacts due its reutilization. However, it's still necessary to investigate which measures can improve the material's compressive strength, such as the use of higher strength-class cements, according to NBR 16697.

**Keywords:** soil-cement, alumina, cement, ceramic materials, construction materials.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de formação dos solos. ....	16
Figura 2.2 - Camadas do solo. ....	16
Figura 2.3 - Triângulo textural para determinação da classe textural. ....	17
Figura 2.4 - Lâminas de filossilicatos dos tipos 1:1 e 1:2. ....	19
Figura 2.5- Transformação das fases do cru em fases do clínquer. ....	20
Figura 2.6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando a) alita; b) belita; c) aluminato tricálcico; e d) ferroaluminato tetracálcico. ....	21
Figura 2.7 - Liberação de calor devido às reações de hidratação ao longo do tempo. .	22
Figura 2.8 - Ligações entre o cimento e a argila. ....	25
Figura 2.9 - Ligações por produtos de reações pozolânicas. ....	26
Figura 2.10 - Efeito da floculação e aglomeração. ....	26
Figura 2.11 - Efeito da troca de íons sobre a argila. ....	27
Figura 2.12 - Tijolo solo-cimento. ....	28
Figura 3.1 - Solo testado para a fabricação de corpos de prova de solo-cimento. ....	41
Figura 3.2 - Exame táctil dos solos: a1-a4) argiloso e b1-b4) arenoso. ....	42
Figura 3.3 – Resíduo de alumina ativada. ....	42
Figura 3.4 - Fluxograma com toda a metodologia utilizada no trabalho. ....	43
Figura 3.5 - Almofariz e mão de gral. ....	44
Figura 3.6 - a) estufa; b) balança digital; c) dessecador com sílica-gel e d) cápsula metálica. ....	45
Figura 3.7 - Arranjo das peneiras utilizadas no ensaio de granulometria. ....	46
Figura 3.8 - Equipamentos necessários para a realização dos ensaios de liquidez e plasticidade. ....	47
Figura 3.9 - a) Pasta obtida pela homogeneização do solo com água destilada; e b) pasta de solo cobrindo a concha do aparelho Casagrande. ....	47
Figura 3.10 - a) local onde a ranhura na pasta está fechada e de onde a amostra foi retirada; b) amostra dentro da cápsula metálica. ....	48
Figura 3.11 - Massa de solo a) ao lado do gabarito e b) detalhe mostrando seu ressecamento. ....	49
Figura 3.12 - a) Forma de concreto e b-d) etapas de marcação da forma. ....	50
Figura 3.13 - a) Preenchimento e b) compactação do corpo de prova na forma. ....	51
Figura 3.14 - Processo de cura dos corpos de prova: a) regagem, b) cobertura com plástico e c) corpo de prova curado. ....	52
Figura 3.15 - a) Corpo de prova retificado, nível e lixa (80 ou 100) e b) aspecto final do corpo de prova de solo-cimento. ....	52
Figura 3.16 - Corpos de prova submersos em caixa com água. ....	53
Figura 3.17 - Corpo de prova na máquina de ensaios universal. ....	53
Figura 3.18 - Corpos de prova de solo-cimento na estufa. ....	54
Figura 3.19 - Microscópio eletrônico de varredura. ....	55
Figura 3.20 - Recobrimento das amostras de solo-cimento para o MEV. ....	55
Figura 4.1 - Curva granulométrica dos solos utilizados. ....	56
Figura 4.2 - Curva granulométrica do resíduo. ....	57



Figura 4.3 - Curvas granulométricas do solo argiloso com a adição de resíduo.....	58
Figura 4.4 - Curvas granulométricas do solo arenoso com a adição de resíduo. ....	58
Figura 4.5 - Número de golpes vs. teor de umidade, obtidos para o solo argiloso. ....	59
Figura 4.6 - Trincas nos corpos de prova de solo-cimento puro, indicadas pelas setas. .....	62
Figura 4.7 - Cristais de material cimentício recobrando matriz de argila. ....	62
Figura 4.8 - Gel de C-S-H sobre matriz de argila, circulado de vermelho. ....	63
Figura 4.9 - Cristais de etringita recobrando trincas. ....	63
Figura 4.10 - Resíduos de alumina incrustados em matriz de solo-cimento.....	64
Figura 4.11 - Gel de C-S-H sobre a matriz argilosa, circulado em vermelho.....	64
Figura 4.12 - Interface entre o resíduo e a matriz de solo-cimento, destacada em amarelo.....	65
Figura 4.13 - produtos do cimento: gel C-S-H (em amarelo) e etringita (em verde). ..	65
Figura 4.14 - Interface entre resíduo e matriz de solo-cimento. ....	66
Figura 4.15 - Interface entre resíduo e matriz de solo-cimento com trincas.....	66
Figura 4.16 - Duas partículas de resíduos incrustados em matriz de solo-cimento. ....	67
Figura 4.17 - Partícula do resíduo de alumina cortado transversalmente.....	68
Figura 4.18 - Região da argila recoberta em cimento.....	68
Figura 4.19 - Resistência à compressão em função do percentual de resíduo. ....	69
Figura 4.20 - Teor de absorção de água em função do percentual de resíduo. ....	70
Figura 4.21 - Efeito da capilaridade em corpos de prova com diferentes percentuais de resíduos.....	71

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Tipos de partícula de solo quanto ao diâmetro. ....	18
Tabela 2.2 - Simplificação da notação dos elementos presentes no cimento.....	21
Tabela 2.3 – Dimensões dos produtos de solo-cimento.....	28
Tabela 3.1 - Quantidade de amostra para a análise granulométrica. ....	43
Tabela 3.2 - Peneiras usadas no ensaio de granulometria. ....	44
Tabela 3.3 - Quantidade relativa de solo, resíduo e cimento por composição.....	51
Tabela 4.1- Teores de umidade obtidos no ensaio de plasticidade.....	60
Tabela 4.2 - Avaliação dos solos testados de acordo com os critérios da NBR 10833.61	
Tabela 4.3 - Análise de composição química feita por FRX. ....	61

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2.	OBJETIVOS .....	13
1.2.1.	Objetivo Principal.....	13
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	14
2.1.	MATERIAIS CERÂMICOS .....	14
2.1.1.	Questões ambientais envolvendo materiais cerâmicos.....	15
2.2.	SOLO-CIMENTO.....	15
2.2.1.	Solo .....	16
2.2.2.	Cimento.....	19
2.2.3.	Estrutura do solo-cimento .....	24
2.3.	TIJOLOS ECOLÓGICOS DE SOLO-CIMENTO .....	27
2.3.1.	Definições e vantagens .....	27
2.3.2.	Normas de fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento.....	29
2.4.	REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM TIJOLOS SOLO-CIMENTO 30	
2.4.1.	Resíduo de mineração de ferro.....	31
2.4.2.	Resíduo de calcário de extração de mármore.....	31
2.4.3.	Resíduos da indústria siderúrgica.....	32
2.4.4.	Escória de soldagem .....	32
2.4.5.	Lã de rocha e fibra de sisal.....	32
2.4.6.	Cinza de secadores de grãos.....	33
2.4.7.	Cinza de bagaço de cana .....	34
2.4.8.	Cinza de casca de arroz.....	34
2.4.9.	Cascas de arroz e de semente de braquiária .....	35
2.4.10.	Pó de serra .....	35
2.4.11.	Areia diatomácea .....	35
2.4.12.	Casca de ovo.....	36
2.4.13.	Areia de fundição.....	36

2.4.14.	Resíduos de tijolo de argila e de fibrocimento .....	36
2.4.15.	Resíduo granulado de borracha de pneu .....	37
2.4.16.	Látex de borracha natural.....	37
2.5.	RESÍDUO DE ALUMINA.....	37
2.5.1.	Alumina.....	38
2.5.2.	Leito de catalisador de alumina.....	38
2.5.3.	Uso de resíduos de alumina na construção civil.....	39
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
3.1.	MATERIAIS.....	41
3.1.1.	Solo.....	41
3.1.2.	Cimento.....	42
3.1.3.	Alumina.....	42
3.2.	MÉTODOS .....	42
3.2.1.	Caracterização do solo .....	43
3.2.2.	Preparação de corpos de prova de solo-cimento .....	50
3.2.3.	Determinação de resistência à compressão .....	53
3.2.4.	Determinação do teor de absorção de água.....	54
3.2.5.	Composição do resíduo de alumina.....	54
3.2.6.	Microscopia eletrônica de varredura.....	55
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	56
4.1.1.	Granulometria do solo.....	56
4.1.2.	Granulometria do resíduo.....	57
4.2.	LIMITE DE LIQUIDEZ E ÍNDICE DE PLASTICIDADE.....	58
4.3.	ADEQUAÇÃO DOS SOLOS À NBR 10833 .....	60
4.4.	COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE ALUMINA.....	61
4.5.	MEV .....	61
4.5.1.	Corpos de prova com 0% de resíduo .....	61
4.5.2.	Corpos de prova com 5% de resíduo .....	64
4.5.3.	Corpos de prova com 10% de resíduo .....	66
4.5.4.	Corpos de prova com 15% de resíduo .....	67
4.6.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	69
4.7.	TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	70

5. Conclusões .....	72
REFERÊNCIAS .....	73

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é um material heterogêneo que ocorre de forma natural, tendo sua origem na desintegração da rocha matriz da crosta terrestre sobre a qual ele se encontra. O solo é utilizado como material de construção desde as primeiras civilizações humanas, e algumas de suas propriedades (como a durabilidade, resistência mecânica, isolamento acústico e térmico) fazem com que ele ainda possa ser usado para este propósito.

Uma das formas mais comuns de transformar o solo argiloso em um material de construção é através da queima. Esta acontece a temperaturas superiores a 900°C e tem por finalidade sinterizar a argila, que é um processo em que há a formação de uma fase vítrea na qual há ganho de resistência mecânica e redução da porosidade em relação à argila crua. Este processo, no entanto, é altamente poluente e consome muita energia, sendo necessário cerca de 2 kW/h para a sinterização de um tijolo. Isso faz com que a estabilização do solo seja vista como com um novo interesse por pesquisadores nos dias de hoje.

Há três formas básicas de estabilização dos solos: a alteração da plasticidade do solo, a compactação do solo, e a adição de ligantes inorgânicos (como o cimento Portland). Essas técnicas podem ser combinadas para a conformação de blocos e tijolos que tenham as propriedades mecânicas desejadas para a sua aplicação na construção civil, mas sem o uso da sinterização. Desta forma, os tijolos e blocos de solo-cimento começaram a ganhar maior popularidade no Brasil sob o termo "tijolos ecológicos".

Também é possível estabilizar os solos e argilas junto com resíduos, o que traz os benefícios de reduzir a quantidade de material em lixões e aterros sanitários e de substituir parte dos insumos usados em construção civil por resíduos, reduzindo os custos com material.

O relatório “*Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021*” da ABRELPE (2021) ajuda a entender a dimensão do problema de gestão de resíduos sólidos no Brasil. Ele mostra que o total de resíduos sólidos urbanos gerados anualmente no Brasil é de 82.477.300 toneladas, enquanto que o total coletado no mesmo período é de 76.079.836 toneladas (ou 92,24%). Porém, do material coletado, 39,8% têm disposição inadequada em lixões e aterros controlados no Brasil, sendo que este número sobe para 63,7% no Nordeste. Além disso, 25,6% dos Municípios não têm qualquer iniciativa de coleta seletiva no país.

Desta forma, a adição de resíduos sólidos em materiais de construção civil é incentivada como mecanismo para auxiliar na gestão de resíduos sólidos.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil é uma destinação promissora para muitos resíduos sólidos, pois os materiais de construção aceitam uma boa variedade de composições. A mistura de solo e cimento é utilizada principalmente na fabricação de blocos e tijolos no Brasil, e vários resíduos já foram pesquisados como insumos alternativos a serem adicionados parcialmente em formulações de solo-cimento.

A alumina é um material cerâmico de alta resistência mecânica e o alumínio, metal presente neste óxido, é um dos componentes principais tanto do solo (compondo os aluminossilicatos) quanto o cimento Portland (compondo os aluminatos hidratados de cálcio).

O resíduo de alumina conhecido com o lama vermelha, produzido durante o processamento da bauxita para fabricação de alumínio metálico, tem como principais componentes os óxidos de ferro e de alumínio e é muito estudado como resíduo que pode ser destinado à produção de materiais de construção civil. Algumas pesquisas indicam que o alumínio presente na alumina pode reagir com silicatos de cálcio semihidratados formando novos produtos de hidratação do cimento, que são responsáveis pelo ganho de resistência mecânica de novas formulações feitas com a adição de resíduos deste material.

O resíduo de alumina ativada, no entanto, apesar de sua composição promissora, ainda não foi investigado como material de adição em formulações de solo-cimento. Faz-se, portanto necessário que este resíduo seja investigado como um material substituto parcial das massas de solo-cimento, visando seu aproveitamento na construção civil, em especial em formulações que possam ser utilizadas para a fabricação de blocos e tijolos ecológicos.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Principal**

Avaliar os efeitos da adição de resíduos de alumina ativada, utilizada como adsorvente na purificação de poliolefinas, em massas de solo-cimento.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Analisar tipos diferentes de solo em relação às suas granulometrias e limites de liquidez e plasticidade;
- Analisar o resíduo de alumina em relação à sua composição química;
- Selecionar os solos apropriados para o preparo de corpos de prova de solo-cimento;
- Preparar diferentes traços de solo, cimento e resíduo para caracterização física, através de:
  - Ensaio de compressão;
  - Ensaio de absorção de água;
- Comparar os resultados dos ensaios de compressão e absorção de água com os requisitos mínimos exigidos pelas normas brasileiras;
- Analisar visualmente a microestrutura das amostras de solo-cimento, com e sem resíduos, para justificar o comportamento dos materiais elaborados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. MATERIAIS CERÂMICOS

A palavra cerâmica tem origem no grego, e era usada para se referir a peças feitas à base de argila, e que eram queimadas - em grego, "*keramos*", de onde vem o nome deste tipo de material. Em engenharia de materiais, a cerâmica tem uma definição mais técnica; ela é um material inorgânico e não-metálico, composto de elementos unidos por ligações iônicas ou covalentes (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2014).

Na ciência de materiais clássica, os materiais são agrupados em três categorias, com base principalmente na natureza de suas ligações interatômicas: metais, polímeros e cerâmicas. Metais, puros ou ligados, consistem em átomos unidos em cristais, com elétrons móveis que superam a repulsão mútua entre os núcleos de íons - sendo esta uma definição para ligação metálica. Os polímeros são macromoléculas formadas pela ligação covalente de muitas unidades moleculares mais simples chamadas de "*meros*". Há também ligações covalentes ou secundárias entre estas macromoléculas e estas ligações determinam muitas das propriedades dos polímeros.

Cerâmicas são geralmente associadas a uma ligação "mista" - uma combinação de ligação covalente, iônica e, às vezes, metálica. Elas consistem em matrizes de átomos; não existem moléculas discretas. A maioria das cerâmicas são compostas por metais ou semimetais combinados com não-metais, sendo em sua maioria óxidos, nitretos ou carbetos (CARTER; NORTON, 2007).

A definição clássica de cerâmica dada por Kingery, Bowen e Uhlmann (1976) diz que cerâmicas são artefatos sólidos que têm como seus componentes essenciais ou principais os materiais sólidos inorgânicos.

As cerâmicas também podem ser definidas por suas propriedades. Elas são rígidas, duras e resistentes à abrasão, além de manterem essa resistência mesmo em altas temperaturas e de serem resistentes à corrosão. Com relação às propriedades ópticas, as cerâmicas podem ser opacas ou transparentes (ASHBY, 1999).

As cerâmicas são muito utilizadas por sua alta resistência mecânica. Esta resistência mecânica é especialmente alta quando o material cerâmico é submetido a compressão. Com relação à tração e flexão, suas resistências podem variar bastante, pois a resistência da cerâmica depende da distribuição e dos tamanhos dos defeitos e não é afetada pelo movimento das discordâncias.

A fragilidade é uma característica típica das cerâmicas em temperatura ambiente. Apesar disso, elas podem exibir comportamento superelástico em altas temperaturas e sob taxas de deformação menores, se forem compostas por grãos muito finos.

Outras propriedades típicas das cerâmicas são seus altos pontos de fusão e suas baixas condutividades elétrica e térmica, que levam estes materiais a serem usados como isolantes elétricos e térmicos. As cerâmicas também apresentam boa estabilidade química, sendo usadas, por exemplo, como recipientes para a manipulação e estocagem de ácidos em laboratórios de química (ASKELAND; FULAY, 2008).



As cerâmicas têm uma ampla gama de aplicações na sociedade moderna e espera-se que a demanda por cerâmicas aumente mais fortemente em um futuro próximo. Em um termo muito amplo, as cerâmicas são usadas na vida cotidiana moderna como tijolos, vidros, telhas, louças, louças sanitárias, partes de carros, materiais abrasivos, em aplicações biomédicas (ossos e dentes artificiais) e em aparelhos elétricos ou eletrônicos. Em todas essas cerâmicas, os produtos são fabricados principalmente pelo consumo de grande quantidade de matérias-primas naturais (HOSSAIN; ROY, 2020).

### **2.1.1. Questões ambientais envolvendo materiais cerâmicos**

As matérias-primas usadas tradicionalmente na fabricação de cerâmicas têm exibido custos crescentes, e por isso sua substituição por materiais complementares e/ou alternativos têm despertado interesse econômico (TANG *et al.*, 2020). Por outro lado, a utilização de resíduos sólidos como matéria-prima secundária na fabricação de vidros, cerâmicas e vitrocerâmicas parece ser a forma mais promissora de seu reaproveitamento (RINCÓN, 2016). Isso porque as matérias-primas naturais utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos à base de argila têm uma grande variação de composição e são materiais muito heterogêneos. Dessa forma, as cerâmicas podem tolerar a grande variedade de substâncias e elementos químicos presentes em resíduos sólidos, permitindo que resíduos de origens diversas possam ser incorporados em sua estrutura interna (ANDREOLA *et al.*, 2016).

Vários fatores têm aumentado a produção de resíduos sólidos ao redor do mundo, como o crescimento populacional, a economia em expansão e a rápida urbanização, que atingem tanto países desenvolvidos quanto em desenvolvimento. A geração anual global de resíduos sólidos recentemente se aproximou de 17 bilhões de toneladas e deve atingir 27 bilhões de toneladas até 2050. (TANG *et al.*, 2020).

Diferentes resíduos inorgânicos podem ser incorporados às cerâmicas, como lamas de processos metalúrgicos, cinzas volantes de carvão, pós de filtro de incineradores de resíduos, material de demolição, resíduos de usinas geotérmicas etc. A grande disponibilidade de resíduos que podem ser utilizados como matéria-prima secundária na fabricação de cerâmicas está levando pesquisadores a desenvolver processos que permitam a reciclagem de resíduos sólidos por meio de sua transformação em materiais cuja aplicação seja diferente da original, como materiais de construção, tijolos refratários, cerâmicas para ornamentação, fritas e vitrocerâmicas (TANG *et al.*, 2020; RINCÓN, 2016).

## **2.2. SOLO-CIMENTO**

O solo-cimento é definido pela ABNT como “*produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem*” em suas normas NBR 12024, “Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento” e NBR 12025 “Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio”.

Dada a definição acima, faz-se necessário entender o que é o solo e o cimento antes de se aprofundar o estudo sobre o material resultante de sua mistura.

### 2.2.1. Solo

O solo é o conjunto de materiais naturais não consolidados presentes na superfície da crosta terrestre. Estes materiais podem ter origem orgânica ou mineral, sendo que os minerais são originários da rocha componente da crosta terrestre e os materiais orgânicos têm origem nos seres vivos em decomposição nas camadas superficiais do solo (IBGE, 2007).

#### 2.2.1.1. Formação dos solos e horizontes de camadas

O intemperismo agride a camada base formada por rocha. Desta forma, o material da base começa a se desprender e se acumular em camadas com características distintas. Estas camadas são identificadas por letras e a região de contato entre elas é chamada de horizonte (TULLIO, 2019). Este processo está ilustrado na Figura 2.1:

Figura 2.1 - Processo de formação dos solos.



Fonte: MUNDO EDUCAÇÃO (2021).

As principais camadas presentes nos solos e suas características são apresentadas a seguir (IBGE, 2007; SANTOS *et al.*, 2018). Algumas destas camadas estão ilustradas na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Camadas do solo.



Fonte: FLORESTAS (2021).

*Camada O*: camada superficial orgânica. Ela contém matéria de origem animal e vegetal em decomposição e também pode ficar saturada com água. Por causa destas características, o solo desta camada não é indicado para a produção de solo-cimento;

*Camada H:* esta também é uma camada com alto índice de matéria orgânica, e por isso também não é indicada para produzir solo-cimento. Esta camada pode ser superficial ou subsuperficial, e nela o material orgânico se acumula em água estagnada;

*Camada A:* camada mineral mais externa, adjacente à Camada O ou à Camada H. Apresenta materiais inorgânicos como componentes principais, especialmente minerais à base de ferro, alumínio e silício. A partir desta camada o solo é indicado para a produção de solo-cimento, devido à sua concentração de minerais;

*Camada B:* camada subsuperficial, adjacente à Camada A, onde há acúmulo de argila e minerais inorgânicos como  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio) e  $\text{CaSO}_4$  (sulfato de cálcio), além de argilominerais à base de Fe, Al e Si. Até a Camada B o solo é chamado de *solum*, que é a seção do solo que mais sofre com intemperismos;

*Camada C:* esta camada aparece logo abaixo do *solum* e sofre pouca ação dos processos pedogênicos, *i.e.*, processos de formação dos solos. No entanto o material desta camada não é tão bem consolidado quanto o material da rocha.

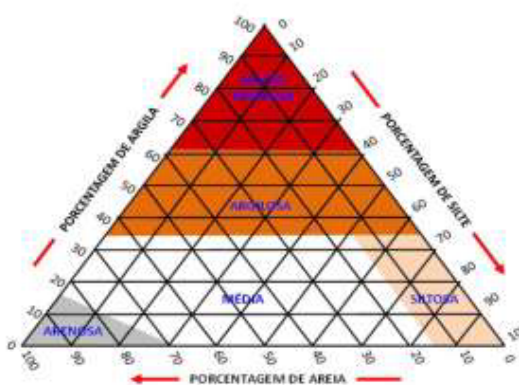
*Camada R:* camada de origem do solo, composta por minerais consolidados em forma de rocha. Este material consolidado forma um meio contínuo na crosta terrestre sobre o qual se assenta o solo formado pelos processos pedogênicos.

### 2.2.1.2. Classificação dos solos quanto à textura

Existem algumas formas de se classificar os solos, dentre elas a consistência, a cerosidade, a estrutura, a textura e a cor. No entanto, a classificação relevante para a elaboração de massas de solo-cimento é a sua classificação de acordo com a textura, pois a proporção entre solo arenoso e argiloso determina a quantidade de cimento necessária para sua estabilização e se o solo é próprio para a fabricação de tijolos, a aplicação mais comum de solo-cimento no Brasil.

A Figura 2.3 abaixo mostra um triângulo textural, que indica o tipo de solo de acordo com a porcentagem de argila, silte e areia.

Figura 2.3 - Triângulo textural para determinação da classe textural



Fonte: TULLIO (2019).

O termo textura é utilizado quando o material apresenta partículas com tamanhos menores do que 2 mm. Quando partículas mais grosseiras, como calhaus e cascalhos, também estão presentes no solo, utiliza-se o termo granulometria.

A Tabela 2.1 mostra o tipo de partícula de solo de acordo seu diâmetro:

Tabela 2.1 - Tipos de partícula de solo quanto ao diâmetro.

<b>Tipo de partícula</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>
Argila	$d < 0,002$
Silte	$0,002 < d < 0,05$
Areia fina	$0,05 < d < 0,2$
Areia grossa	$0,2 < d < 2$

Fonte: IBGE (2007).

### 2.2.1.3. Mineralogia dos solos

Os minerais são sólidos homogêneos formados por processos inorgânicos que ocorrem na natureza, caracterizados por arranjos atômicos altamente ordenados, e que possuem composição química definida. A forma dos arranjos atômicos e a composição química são os dois fatores definidores das propriedades dos minerais.

Os minerais são classificados primeiramente em classes de minerais de acordo com a sua composição química. Dentro destas classes, os minerais são subdivididos em categorias de acordo com suas semelhanças estruturais. Assim, as principais classes minerais são os haletos, sulfatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos e silicatos (SCHULZE, 2002):

*Haletos*: o mineral mais comum deste grupo é a **halita**, que é comumente conhecido como sal de cozinha e tem a fórmula NaCl. Ele é composto por íons alternados de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  numa estrutura cúbica de face centrada.

*Sulfatos*: o mineral mais comum desta classe é a **gipsita**, que apresenta a fórmula  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e é usada comumente como gesso.

*Carbonatos*: seus principais minerais são a **calcita** ( $\text{CaCO}_3$ ) e a **dolomita** ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Eles também são facilmente solúveis e estão presentes em solos de regiões áridas e semiáridas. Em solos de regiões úmidas, eles acabam sendo lixiviados e se acumulam na Camada C. A depender da necessidade de aplicação do solo, o carbonato pode ser introduzido artificialmente através do calcário.

*Óxidos e hidróxidos*: estes minerais são estáveis mesmo com o intemperismo sofrido pelo solo. A ação da natureza remove cátions e ânions de minerais primários. Estes se recombinaem com íons de oxigênio e hidroxila para formar novas substâncias que sejam estáveis sob ação dos intemperismos. Os principais elementos que se combinam com estes íons são Al, Fe, Mn, e Ti:

- Alumínio: o mineral mais comum é a **gibbsita** ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), que é comum em solos que sofrem com muito intemperismo. Devido à sua baixa capacidade de trocas de cátions, sua presença indica baixa fertilidade do solo;
- Ferro: seus óxidos e hidróxidos são estáveis em ambientes oxidantes, como no caso de solos bem aerados. A presença de seus minerais indica estágio avançado de intemperismo. A coloração dos minerais de ferro pode variar de amarelada para castanha (**goethita**) e marrom para avermelhada (**hematita**). Eles também são comumente encontrados em associação com a gibbsita e caulinita.
- Manganês: os principais minerais formados por óxidos e hidróxidos deste elemento são a **birnessita** e **litioforita**. Ele é encontrado na forma de filmes finos nas

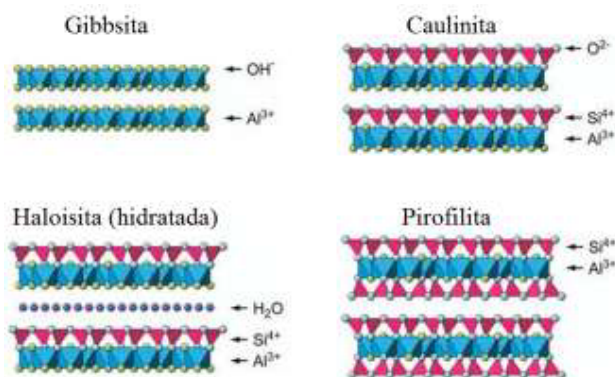
superfícies de unidades estruturais do solo, e pode ser tanto oxidado quanto reduzido neste meio.

- Titânio: seus óxidos são comuns nos solo, e seus principais minerais são o **rutilo** e a **ilmenita**, que têm origem em rochas ígneas.

*Silicatos*: estes minerais formam 40% dos tipos de minerais comuns, somando mais de 90% do volume da crosta terrestre. Eles são os principais componentes dos solos. Os minerais silicatos primários são formados a partir de rochas ígneas e os mais comuns presentes nas areias e siltes são as **olivinas**, **micas**, **feldspatos** e **quartzo**. Já nas argilas, os minerais mais comuns são os filossilicatos, cujas moléculas se arranjam em formas de lâminas - e daí o seu nome (*phyllos* vem do grego e significa folha).

As estruturas tetraédricas e octaédricas formadas por íons  $\text{Si}^{+4}$  e  $\text{O}^{-2}$  são os blocos de construção básicos das redes cristalinas dos silicatos. No caso dos filossilicatos, estas redes têm o formato de folhas, e podem ainda se combinar em lâminas do tipo 1:1 ou 1:2, como são os casos da caulinita e da pirofilita, respectivamente, mostradas na Figura 2.4. No primeiro tipo, as redes de tetraedros se combinam com uma rede de octaedros; no segundo, uma rede de octaedros no centro se combina a duas redes de tetraedros, num formato de sanduíche. Os filossilicatos podem possuir materiais interlaminares em suas estruturas, como cátions, moléculas orgânicas e hidróxidos, como é o caso da haloisita hidratada, também mostrada na Figura 2.4. A soma das lâminas com seus materiais interlaminares forma uma “unidade estrutural”.

Figura 2.4 - Lâminas de minerais filossilicatos.



Fonte: Adaptado de SCHULZE (2002).

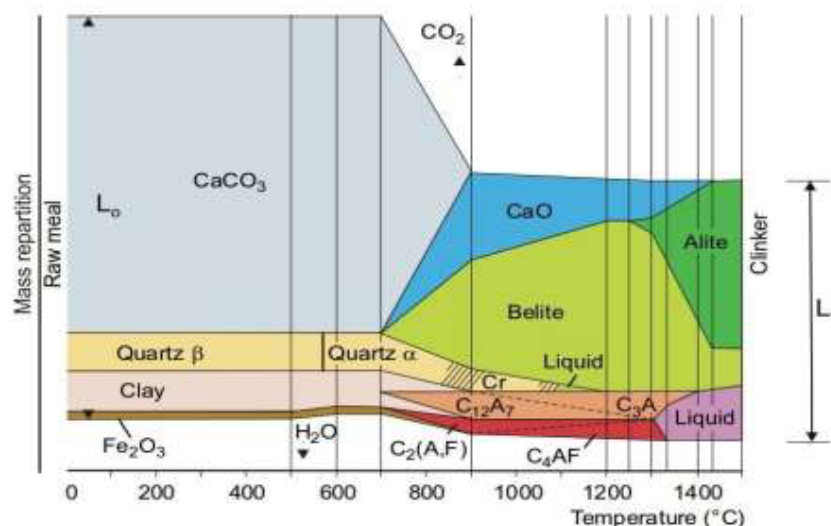
### 2.2.2. Cimento

Materiais cimentícios são materiais que, em contato com a água, são dotados de plasticidade e que endurecem gradualmente através de reações de hidratação para formar uma rocha artificial. O principal material cimentício usado em elementos estruturais é o cimento Portland. Este material recebeu este nome quando patentado pelo inglês Joseph Aspdin em 1824 devido à sua semelhança, quando endurecido após a hidratação, com as rochas da ilha britânica de Portland. Devido ao papel da água na estrutura do cimento Portland, ele é classificado como um cimento hidráulico (KETT, 2000).

O cimento Portland é fabricado a partir da mistura de calcário e argila que, quando misturados a alta temperatura ( $> 1450^{\circ}\text{C}$ ) formam o clínquer. Este é moído junto com gesso com o intuito de retardar o início da pega, que é a perda de plasticidade da massa de cimento. As argilas devem conter alguns óxidos em certas proporções apropriadas para a fabricação do clínquer, como os óxidos de silício, alumínio, cálcio e ferro. (AİTCIN, 2016). Além do gesso, podem ser adicionados outros componentes para melhorar as propriedades do cimento, como escória, pozolana ou *filler*.

Sendo assim, a composição do cimento Portland é basicamente clínquer pulverizado, que consiste em silicatos de cálcio ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  e  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) com a adição de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ). A evolução das fases que ocorrem no forno enquanto a argila e calcário se transformam em clínquer é mostrada na Figura 2.5:

Figura 2.5- Transformação das fases do cru em fases do clínquer.



Fonte: AİTCIN (2016).

O calcário serve como fonte de óxido de cálcio, e as argilas como fonte de óxido de alumínio e sílica. O óxido de ferro também está normalmente presente nas argilas e ele serve como fundente, além de formar compostos com a cal e a alumina. Além destas substâncias principais, as matérias-primas podem conter percentuais diminutos de substâncias com outros elementos como enxofre, zinco, flúor, fósforo e magnésio, além de elementos dos grupos alcalinos e alcalinos-terrosos.

#### 2.2.2.1. Composição do cimento Portland

As fases presentes no cimento tem composição elementar complexa, e por isso elas são dadas usando uma simbologia simplificada (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002), como mostra a Tabela 2.2 abaixo:

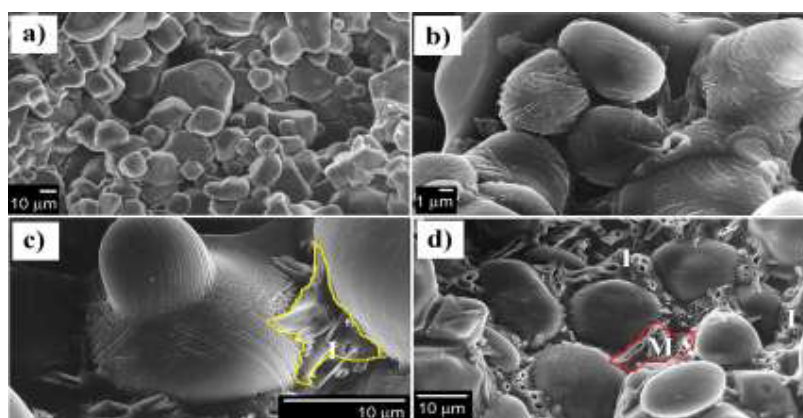
Tabela 2.2 - Simplificação da notação dos elementos presentes no cimento.

Fórmula química	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Simplificação	C	S	A	F	H	K	N	β

Fonte: Autoria própria.

As principais fases presentes no cimento Portland (AÏTCIN, 2016) estão mostradas na Figura 2.6 e suas características são apresentadas a seguir.:

Figura 2.6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando a) alita; b) belita; c) aluminato tricálcico; e d) ferroaluminato tetracálcico.



Fonte: Adaptado de AÏTCIN (2016).

- Alita, ou silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ): possui composição  $\text{C}_3\text{S}$  e não existe em forma pura no clínquer comercial, onde acaba havendo dissolução de magnésio e alumínio nesta fase. Ela é o principal componente do cimento Portland comum (50-60%) e promove o aumento da dureza do material (Figura 2.6 a);
- Belita, ou silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ): possui composição  $\text{C}_2\text{S}$  e sua forma presente no cimento comercial comum também apresenta outros elementos dissolvidos em si, como alumínio, magnésio e potássio. Ela reage lentamente com a água e contribui pouco para o aumento da resistência do cimento nos primeiros 28 dias. Porém, com um ano de idade, a belita e a alita puras apresentam as mesmas resistências (Figura 2.6 b);
- Aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ): possui composição  $\text{C}_3\text{A}$  e sua reatividade varia com a presença de determinadas impurezas em sua estrutura cristalina. Em sua forma pura o aluminato tricálcico é bastante reativo, mas a presença de elementos alcalinos em seus cristais diminui a sua reatividade (Figura 2.6 c, destacado em amarelo);
- Ferro aluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ): possui composição  $\text{C}_4\text{AF}$  e se comporta de forma similar ao aluminato tricálcico, porém suas reações na presença de água são mais lentas. Eles também reagem mais lentamente na presença do mineral gipsita ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), que é usado para retardar as reações de ambas fases. Há uma variante na fórmula do ferro aluminato tricálcico representada por  $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$  (Figura 2.6 d, destacado em vermelho).

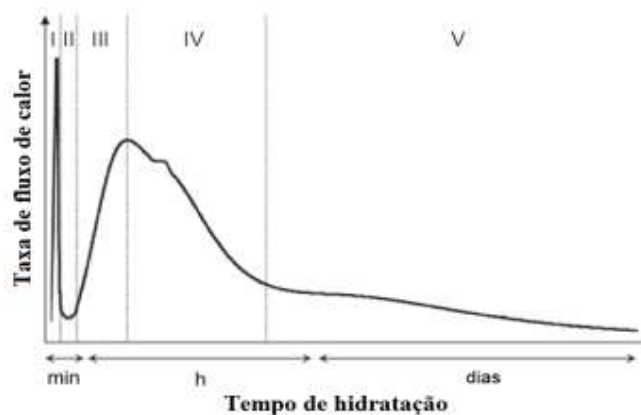
### 2.2.2.2. Hidratação do cimento Portland

Uma reação de hidratação é uma reação em que o composto anidro reage com água para formar um composto hidratado. No caso do cimento, a reação de hidratação é a responsável pelas mudanças físico-mecânicas conhecidas por cura e endurecimento. Esta reação pode ocorrer parcialmente com a umidade do ar, mas para as aplicações do cimento Portland como um elemento estrutural, o material em pó seco precisa ser misturado com a água. A proporção de água e cimento (a/c) afeta o progresso das reações de hidratação, assim como as propriedades do cimento endurecido. A hidratação do cimento Portland é mais do que uma reação simples; é um processo que envolve uma série de reações paralelas e consecutivas. Todo este processo é influenciado por diversos outros fatores além da proporção entre água e cimento, como a composição do clínquer, o tamanho das partículas de cimento e sua área superficial, a presença de aditivos químicos para cimento, adição de outros materiais ao clínquer (como pozolanas e escória de alto-forno) e a temperatura de cura (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Há dois mecanismos propostos para hidratação do cimento Portland. O primeiro é o dissolução completa, no qual composto anidro é completamente dissolvido em seus íons, seguido da reação de formação dos hidratos. A solução passa a ser supersaturada com hidratos e ela então precipita os microconstituintes do cimento hidratado. O segundo mecanismo é o de hidratação no estado sólido, no qual as reações de hidratação acontecem na superfície dos compostos anidros que neste caso não são completamente dissolvidos na água. Alguns estudos indicam que ambos mecanismos podem colaborar com a hidratação do cimento, sendo a dissolução completa dominante nos estágios iniciais de hidratação, e a hidratação no estado sólido dominante em estágios tardios (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

A Figura 2.7 mostra a evolução do calor de hidratação liberado ao longo do processo de cura e envelhecimento do cimento que varia de acordo com a evolução dos quatro compostos principais do cimento Portland:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ .

Figura 2.7 - Liberação de calor devido às reações de hidratação ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de AÏTCIN (2016).



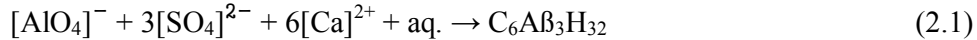
A hidratação destas fases não é simultânea. Na fase I há uma grande liberação de energia devido às dissoluções iniciais de alita ( $C_3S$ ) e aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). O  $C_3A$  reage tão rapidamente com a água, que o clínquer é moído com gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) durante a fabricação do cimento, pois o sulfato ajuda a controlar a velocidade de reação do aluminato. Quando o  $C_3A$  passa pelo processo de hidratação na presença de gipsita, ela precipita trissulfoaluminato de cálcio hidratado, ou etringita, (AFt). Depois, quando há o consumo do sulfato da gipsita, a etringita passa a reagir com o aluminato tricálcico remanescente, produzindo monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). Em seguida, a atividade química é bastante reduzida e isto é representado pelo "vale" na fase II. A alita ( $C_3S$ ) e o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) continuam suas hidratações nas fases III e IV, quando volta a ocorrer uma notável liberação de calor, enquanto que as hidratações de belita ( $C_2S$ ) e ferro aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) ocorrem principalmente na fase V (AÏTCIN, 2016). Alguns pontos desta curva são indicativos de reações específicas como:

- O pico entre as fases III e IV indica o ponto principal de dilatação de  $C_3S$ ;
- Há uma pequena sessão de liberação de calor constante na fase IV, que indica a diminuição substancial de sulfatos e consequente aumento da hidratação do  $C_3A$ ;
- A "lombada" na fase V indica a conversão de etringita em monossulfoaluminato.

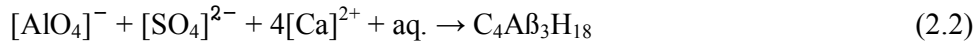
As hidratações dos aluminatos e dos silicatos podem ser analisadas separadamente, pois eles produzem dois grupos distintos de microconstituintes do cimento. A hidratação dos aluminatos produz sulfoaluminatos enquanto que a hidratação dos silicatos produz compostos hidratados de cálcio. Os aluminatos são hidratados muito mais rapidamente do que os silicatos e são responsáveis pela pega do cimento, que provocam a perda de plasticidade da pasta. Já a hidratação dos silicatos é responsável pelo endurecimento do cimento, produzindo o ganho de resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

A reação do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) com a água produz diversas fases cristalinas como  $C_3AH$ ,  $C_4AH_{19}$  e  $C_2AH_8$ . Essas reações são rápidas e liberam muito calor, seguida de uma perda de plasticidade instantânea da pasta de cimento. Para evitar este fenômeno e manter uma boa trabalhabilidade da massa por um período mais longo o clínquer é fabricado com a adição de gipsita, que retarda a reação do  $C_3A$ . Por isso, faz mais sentido discutir a hidratação do aluminato na presença de gipsita do que puro. A gipsita retarda a reação dos aluminatos pois se dissolve mais rapidamente na água em comparação com o aluminato de cálcio, e isso diminui a capacidade da água de dissolver mais compostos. Após a dissolução de ambos,  $C_3A$  e  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , parte do aluminato é precipitado junto com sulfatos podendo formar dois tipos de cristais (AÏTCIN, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2013):

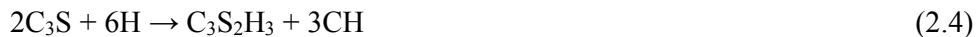
*I - Trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt)* : esta fase contém alta concentração de sulfatos, e é precipitada em forma de agulhas, quando a taxa de sulfato/aluminato é alta. Sua precipitação contribui com a pega do cimento e o ganho de resistência inicial. Esta fase também é conhecida como etringita e sua reação é dada pela Equação 2.1:



*II - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm)* : esta fase começa a ser precipitada quando a proporção de sulfato diminui e a etringita se torna instável. O AFm pode ser formado tanto através das reações de íons com a água quanto pela reação de atingida com aluminato tricálcico, como mostram as Equações 2.2 e 2.3:



A hidratação dos silicatos tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) produzem uma família de substâncias conhecidas como silicatos de cálcio hidratados. Como a composição dessas substâncias varia em relação à quantidade de cal ( $\text{CaO}$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), sua notação comum é C-S-H, que não indica uma proporção definida destes reagentes. Apesar da indefinição das composições deste silicatos, a composição aproximada do C-S-H após a hidratação completa do silicato de cálcio é  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ . Esta é a fórmula usada nas equações das reações envolvendo os silicatos de cálcio hidratados. Além do C-S-H, a alita e a belita também formam outro composto com cal chamado de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$  ou  $\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$ , e por isso também notada como CH). A hidratação da alita libera mais portlandita por ser mais rica em cal (MEHTA & MONTEIRO, 2001; MARCHON, D. & FLATT, R.J., 2016). Assim, podemos expressar as reações de hidratação da alita e belita de acordo com as Equações 2.4 e 2.5, respectivamente:



### 2.2.3. Estrutura do solo-cimento

O solo-cimento é produzido através da mistura de uma quantidade adequada de cimento ao solo, homogeneização desta mistura com a quantidade adequada de água e que a massa úmida e homogênea seja compactada antes da hidratação do cimento. Como o solo é o principal componente do solo-cimento, é preciso que ele seja devidamente identificado e classificado. O solo pode ter composições variadas de areia, silte e argila, e uma grande variedade de minerais pode estar presentes no solo utilizado, contanto que a mistura final esteja adequada à aplicação em engenharia (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1992).

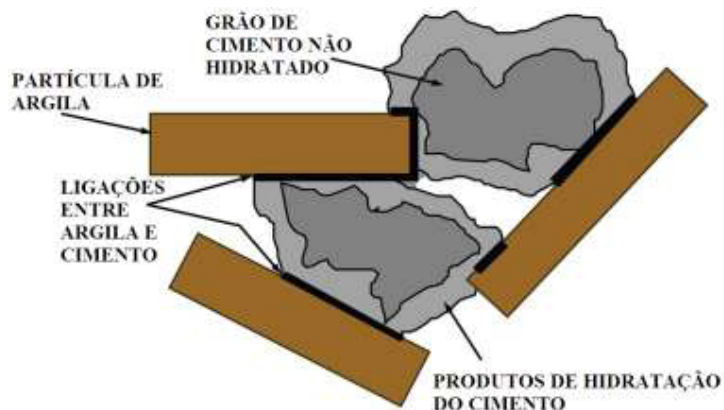
O cimento modifica o solo diminuindo sua plasticidade, reduzindo sua variabilidade volumétrica e aumentando sua capacidade de carga. Mas o fator que mais contribui para a melhoria das propriedades físicas do solo é o endurecimento do cimento. Porém, além das reações de hidratação do cimento com a água, parte das substâncias presentes no cimento também reage com as partículas do solo formando material cimentício adicional, o que aumenta tanto a força de ligação entre o solo e o cimento, quanto entre os grãos de solo. Em

suma, há quatro mecanismos de modificação do solo que ocorrem quando eles são acrescidos de cimento (GROSS; ADASKA, 2020; WANG, 2002):

### 2.2.3.1. Hidratação do cimento

Os produtos de hidratação do cimento formam ligações com as partículas flocladas de argila formando agregados ainda maiores. A maior parte destas reações ocorre nos primeiros 30 dias de adição do cimento ao solo. Uma representação dessas ligações é mostrada na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Ligações entre o cimento e a argila.

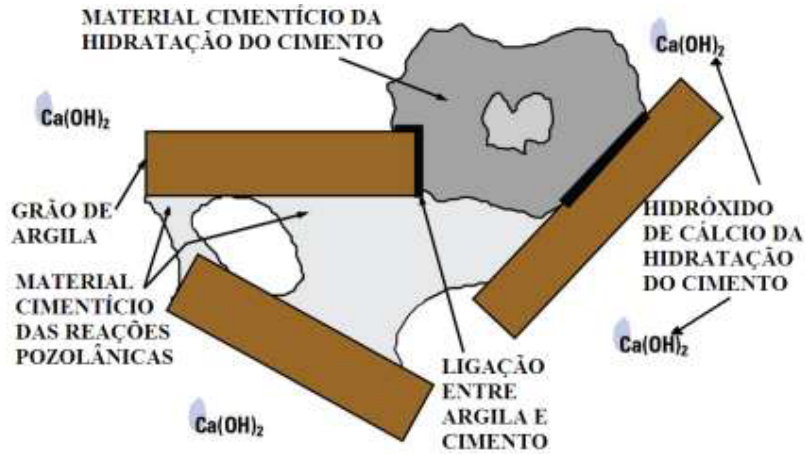


Fonte: Adaptado de GROSS; ADASKA (2020).

### 2.2.3.2. Reações pozolânicas

Estas são reações secundárias que ocorrem quando há hidratação do cimento. No caso da mistura de solo-cimento, estas reações ocorrem entre o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que é produto da hidratação do cimento, e a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentes no solo. A primeira reação gera silicato hidratado de cálcio (C-S-H) e a segunda, aluminato hidratado de cálcio (C-A-H). As reações pozolânicas ocorrem em proporções menores que as de hidratação, mas aumentam a resistência do solo-cimento ao longo de meses, ou até anos. A liberação de hidróxido de cálcio também colabora com as reações pozolânicas por manter o pH alto da mistura. Uma representação de seus produtos é mostrada na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Ligações por produtos de reações pozolânicas.



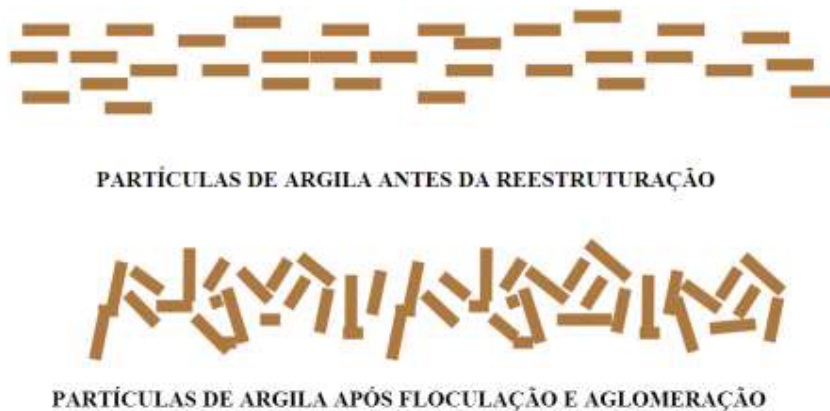
Fonte: Adaptado de GROSS; ADASKA, 2020

### 2.2.3.3. Reestruturação de partículas

As argilas apresentam partículas alinhadas, com um certo espaço entre elas. Este espaço é reduzido através da floculação e aglomeração, que modificam a argila de um material plástico de grãos finos para um mais grosseiro e frágil.

A floculação ocorre quando as partículas de argila começam a formar massas através da reação química com o cimento, e a aglomeração ocorre quando as partículas se juntam através de ligações secundárias. Ambas as ligações aumentam a solidez do solo e o aspecto das partículas de solo antes e depois da reestruturação é mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Efeito da floculação e aglomeração.



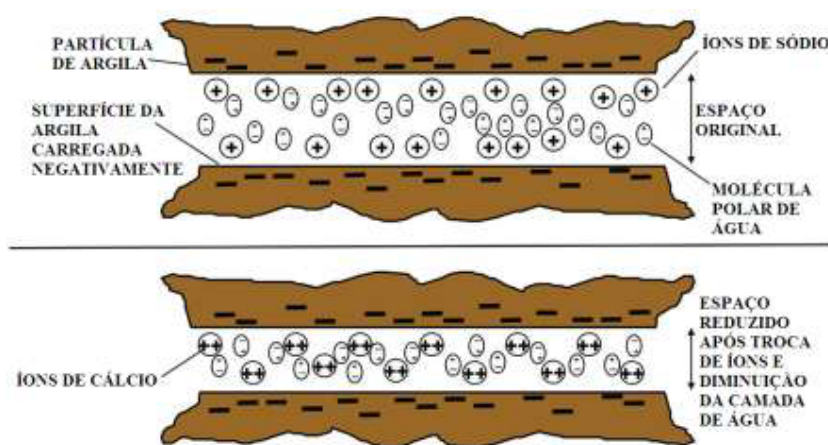
Fonte: Adaptado de GROSS; ADASKA (2020).

#### 2.2.3.4. Troca de cátions

As argilas presentes nos solos são compostas principalmente por aluminossilicatos em forma de lâminas. Estas lâminas possuem uma carga global negativa que atrai cátions e moléculas polares (como a da água). A presença destas substâncias entre as partículas lamelares de argila afasta as lâminas, e quanto mais afastadas, mais plástica será a argila.

A troca de cátions ocorre quando os íons positivos de outros elementos ocupam a região intralamelar da argila. Cátions monovalentes, como o de sódio, produzem maior afastamento das lâminas. O cimento fornece outro tipo de cátion ( $\text{Ca}^{++}$ ), que reduz o espaço das lâminas e reduz a plasticidade, como mostra como mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 - Efeito da troca de íons sobre a argila.



Fonte: Adaptado de GROSS; ADASKA (2020).

## 2.3. BLOCOS E TIJOLOS ECOLÓGICOS DE SOLO-CIMENTO

### 2.3.1. Definições e vantagens

As normas NBR 8491: “Tijolo de solo-cimento – Requisitos” e NBR 10834: “Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos” definem tanto o bloco quanto o tijolo de solo-cimento como:

*“Componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água e, eventualmente, aditivos e/ou pigmentos em proporções que permitam atender aos requisitos desta norma (...)”.*

A diferença entre os dois componentes são suas dimensões. A Tabela 2.3 mostra as dimensões dos blocos e dos tijolos, que podem ser do tipo A ou B. Comercialmente, no entanto, é mais comum que se refiram aos produtos como “tijolos ecológicos”.

Tabela 2.3 – Dimensões dos produtos de solo-cimento.

<b>Componente</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>
Bloco	300	150	150
Tijolo tipo A	200	100	50
Tijolo tipo B	240	120	70

Fonte: ABNT (2012 a, d).

O solo-cimento tem como características físicas a boa resistência à compressão e durabilidade, além de baixo índice de absorção de água e baixa retração, sendo indicados para o uso em base de pavimentos asfálticos, paredes monolíticas, como blocos de vedação e em elementos estruturais (PINTO, 2016).

O tijolo solo-cimento, mostrado na Figura 2.12, tem como uma de suas vantagens o baixo custo de produção, tanto por usar solo como matéria-prima, como por não usar o processo de queima das cerâmicas brancas e vermelhas. Esta última característica também faz com que os tijolos sejam vantajosos do ponto de vista ambiental, pois reduz a emissão de poluentes, fazendo com que os tijolos solo-cimento sejam conhecidos como tijolos ecológicos. Como não passam por queima, a resistência destes tijolos vem das reações de hidratação do cimento utilizado em sua massa (Lôbo *et al*, 2020).

Figura 2.12 - Tijolo solo-cimento.



Fonte: (ECO MÁQUINAS, 2022).

Outras vantagens (GIORGI *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2018) dos tijolos solo-cimento são:

- Redução da necessidade de transporte, pois eles podem ser fabricados com solo local;
- Redução de desperdício de material na obra;
- Fabricação através de equipamentos simples e de baixo custo;
- Método de fabricação rápido;
- Alta uniformidade de fabricação;
- Redução dos custos totais da obra em comparação com o uso de alvenaria tradicional.

Sobre esta vantagem econômica apresentada por último, vale ressaltar que o tijolo ecológico tem um preço mais alto no mercado, mas a redução de desperdício e do uso de outros materiais reduz o custo global da obra em até 40% (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

A fabricação dos tijolos pode ser dividida nas seguintes etapas: preparação do solo, homogeneização da mistura, moldagem dos tijolos, prensagem, cura e armazenamento (GIORGI *et al*, 2018; SIMIONI *et al*, 2020).

O solo é o principal componente da mistura de solo-cimento utilizado nos tijolos. Isso faz sentido em um tijolo que se quer ecológico, pois o solo é usado em sua forma natural, enquanto que a fabricação de cimento depende de um processo altamente poluente e que demanda muita energia, que é a calcinação. Além disso, o solo é abundante e reduz os custos da massa final. No entanto, os solos são instáveis, e por isso o cimento é utilizado como estabilizador.

As primeiras pesquisas sobre solo-cimento foram feitas no Brasil na década de 1930, quando houve a primeira regulamentação de seu processo de fabricação pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (NASCIMENTO *et al*, 2018).

Os primeiros tijolos solo-cimento foram usados no Brasil ainda na década de 1930 como base de pavimentação. Na década seguinte, eles começaram a ser usados na construção de casas e um até mesmo de um hospital em Manaus-AM (NASCIMENTO *et al*, 2018; LÔBO *et al*, 2020).

Os tijolos solo-cimento ainda são pouco utilizados no Brasil. Lôbo *et al* (2020) investigaram o grau de adoção desses tijolos no mercado da construção civil da Região Metropolitana de Cariri, no Ceará. 71% dos entrevistados disseram não utilizar o material por dificuldades em encontrar fornecedores e pessoal qualificado para trabalhar com os tijolos, além da baixa aceitação pelos clientes. No entanto, os 29% que utilizavam os tijolos tinham um ótimo grau de satisfação com o produto.

### **2.3.2. Normas de fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento**

A norma utilizada para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento é a norma *NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento*. Esta norma exige que os materiais utilizados nos tijolos e blocos sigam requisitos determinados em outras normas relacionadas, mostradas a seguir:

#### *2.3.2.1. Normas para o solo*

As amostras devem ser preparadas de acordo com a norma *NBR 6457/2016: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, antes da realização dos ensaios de liquidez e plasticidade.

As amostras de solo devem conter pouca matéria orgânica. Além disso, as características do solo a ser usado na fabricação de tijolos de solo-cimento são:

- 100% deve passar pela peneira de malha 4,75mm (4 MESH);
- Entre 10% e 50% deve passar pela peneira de 75µm (200 MESH);
- Limite de liquidez menor ou igual a 45%, medido de acordo com a norma *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio*;
- Índice de plasticidade menor ou igual a 18%. Este índice é calculado com a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, que é medido de acordo com a norma *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade - Método de ensaio*.

O solo também deve ser caracterizado com relação à sua granulometria, de acordo com a norma *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio*.

### 2.3.2.2. Norma para o cimento

Deve seguir as especificações da norma *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Os cimentos comerciais já seguem estas normas, por isso eles não precisam ser ensaiados pelo fabricante de tijolo e/ou bloco de solo-cimento.

### 2.3.2.3. Norma para a água

Deve seguir as especificações da norma *NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto, Parte 1: Requisitos*. No entanto, esta norma determina que a água de abastecimento público é considerada adequada para ser usada na mistura de concreto, e por isso não há necessidade de ser ensaiada.

### 2.3.2.4. Instruções da NBR 10833 para a fabricação de tijolos e blocos

A mistura do solo-cimento deve ser feita manualmente ou mecanicamente. O solo deve ser destorroado e peneirado, e o cimento deve ser adicionado e misturado até que a cor da mistura fique homogênea. A água deve ser colocada em seguida, até atingir o ponto ideal de trabalho.

Em seguida, as peças devem ser moldados. As misturas devem ser transferidas de imediato para os moldes para a compactação, que pode ser manual ou em prensa mecânica. Peças com altura entre 80mm e 200mm devem ser prensados em prensas com duplo sentido de compressão.

Após a compressão, os blocos ou tijolos devem ser empilhados sobre uma superfície plana e lisa, à sombra, em uma altura de até 1,5m. Eles devem ser mantidos umedecidos por no mínimo 7 dias para serem devidamente curados.

Os tijolos e blocos devem ser usados pelo menos 14 dias após sua fabricação.

### 2.3.2.5. Instruções da NBR 10833 para os ensaios dos tijolos

Tanto os tijolos quanto os blocos devem ter sua resistência à compressão e absorção de água testadas para serem validados como materiais de construção. Para isso, devem ser preparados 3 traços de solo-cimento, e de cada uma dessas três misturas, devem ser fabricados 20 peças. 10 peças de cada traço devem ser testadas em laboratório para validação.

O tempo de cura mínimo para os tijolos serem testados é de 7 dias.

Ambos os testes mencionados acima devem seguir a norma *NBR 8492: Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio*. Em seguida, os resultados dos testes devem atender aos critérios da norma *NBR 8491: Tijolo de solo-cimento - Requisitos* e *NBR 10834: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos*, que determinam o valor mínimo de resistência à compressão e o valor máximo de absorção de água dos tijolos ecológicos.

## 2.4. REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM TIJOLOS SOLO-CIMENTO

O solo-cimento vem sendo estudado como uma alternativa para a redução de impactos ambientais da construção civil e de outras indústrias. Vários materiais são adicionados ao



solo-cimento utilizado não só na fabricação de tijolos, mas também em outros usos para essa mistura (PINTO, 2016).

Nesta seção serão apresentadas as pesquisas mais recentes sobre o uso de resíduos sólidos em tijolos solo-cimento. Foram utilizadas as bases do Scopus, Google Scholar, e ScienceDirect para fazer esta pesquisa. Os principais termos de busca foram “tijolos ecológicos”, “tijolos solo-cimento” e “*soil-cement brick*”.

O termo “tijolo ecológico” é mais amplo e, apesar de referir a tijolos solo-cimento na maioria das pesquisas, ele também é usado em pesquisas em que não há o uso de um desses materiais (ou de ambos). Estas pesquisas sem uso de solo ou de cimento não serão apresentadas nesta seção. Importante notar que quase a totalidade dos artigos encontrados, mesmo com o termo em inglês, tratava-se de publicações de pesquisas brasileiras em revistas internacionais.

Os resíduos sólidos adicionados em tijolos solo-cimento na literatura foram os seguintes:

#### **2.4.1. Resíduo de mineração de ferro**

Vilela *et al.* (2020) usaram resíduo de mineração de ferro para substituir parcialmente o solo em misturas de solo cimento nas proporções de 0, 10, 20, 30 e 40%. Foi usado 10% de cimento CP V, e o resíduo tinha alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ , 85%), seguido de ferro (Fe, 14,5%). O alto índice de  $\text{SiO}_2$  no resíduo aumentou a resistência dos tijolos pois ela reage com hidróxido de cálcio na água, formando silicato hidratado de cálcio.

O DRX do solo mostrou principalmente goethita, gibbsita, feldspato, quartzo e caulinita. Este último mineral possui ligações fortes que reduzem a quantidade de água absorvida.

O resíduo também apresenta uma granulometria predominantemente argilosa (52% argila; 16% silte; e 32% areia). Esta distribuição das partículas permitiu que elas preenchessem vazios, reduzindo a porosidade. A melhoria do empacotamento com a adição do resíduo levou a redução do volume de vazios (porosidade capilar) reduzindo o percentual de absorção de água, que teve seu melhor resultado com a formulação de 40% de resíduo de mineração de ferro.

A superfície específica do resíduo também se mostrou próxima à do cimento, indicando que ele também tinha uma boa interação com o cimento e os elementos de suas reações de hidratação.

#### **2.4.2. Resíduo de calcário de extração de mármore**

França *et al.* (2018) adicionaram resíduos de calcário oriundos da extração e processamento de mármore em misturas de solo-cimento para a fabricação de blocos nas proporções de 30%, 40% e 50% do volume total da mistura, mantendo um percentual de 10% de cimento.

A FRX do resíduo mostrou que os principais elementos presentes eram CaO (72,56%) e MgO (13,97%), típico de rochas carbonáticas como o calcário.

Todas as composições atenderam aos requisitos de absorção de água e de resistência à compressão das normas ABNT, ou seja, apresentaram menos que 20% de absorção de água e resistência maior que 2 MPa. Porém, no primeiro critério, apenas os materiais com 30% e

40% de resíduo tiveram desempenho melhor que o controle (sem resíduo). Já com relação à resistência à compressão, apenas a formulação com 30% de resíduos mostrou melhorias em relação aos corpos de prova de controle (sem resíduos).

#### **2.4.3. Resíduos da indústria siderúrgica**

Castro *et al* (2016) utilizaram 3 resíduos de indústrias siderúrgicas, além de resíduos dos próprios tijolos solo-cimento em sua pesquisa. Os resíduos foram: pó de balão de alto-forno, pó de filtro de despoeiramento de aciaria elétrica, e escória de forno elétrico a arco. As amostras tiveram variação na quantidade de resíduos, sendo que cada uma delas tinha um resíduo siderúrgico e resíduo de solo-cimento.

O solo utilizado tinha baixa fração argilosa, sendo predominantemente arenoso - condição exigida pela norma. Solos desse tipo também têm a vantagem de demandarem menos cimento em sua mistura. A granulometria maior também se refletiu em baixa plasticidade medida por ensaio.

A granulometria do pó de filtro de despoeiramento era muito fina e reduzia a aglomeração de areia ao cimento. Devido a isso, sua melhor formulação com relação à compressão e absorção de água apresentava uma quantidade baixa de resíduo (2,5%) e maior quantidade de resíduo de tijolo (20%) que os demais resíduos. Para se comparar, as melhores formulações com pó do alto-forno e escória de forno elétrico a arco tinham 20% de resíduo siderúrgico e 10% de resíduo de tijolo.

Todas as formulações testadas nesta pesquisa passaram nos critérios de resistência à compressão e absorção de água exigidos pelas normas.

#### **2.4.4. Escória de soldagem**

A escória de soldagem foi utilizada como substitutivo parcial do cimento em tijolos solo-cimento por Siqueira *et al* (2016). As principais fases deste resíduo são quartzo, espinélio, rutilo, fluorita, óxido de manganês e cristobalita.

As amostras foram curadas em câmara úmida a 24°C e 95% de umidade por 28 dias. A microscopia de varredura mostrou a presença de porosidades capilares típicas de peças de solo-cimento em amostras sem resíduos. Já nas amostras com carga de escória, a região da fratura se mostrou mais densa, com redução da porosidade, fato que leva à redução da absorção de água das amostras com escória.

A escória também diminuiu a retração volumétrica das amostras, por ser um material não plástico, o que reduz a plasticidade global da mistura. Em relação à resistência à compressão, esta diminuiu com o acréscimo de escória, por este material ter baixa adesão na matriz cimentícia. Apesar disso, todas as amostras atenderam às normas de resistência mecânica de tijolos solo-cimento.

#### **2.4.5. Lã de rocha e fibra de sisal**

Gutiérrez-Orrego *et al.* (2017) utilizaram fibras de sisal e lã de rocha em composições de solo-cimento para a fabricação de blocos. As fibras foram acrescentadas nas proporções de 0,1%, 0,25% e 0,4%, enquanto que o material mineral foi acrescentado nas quantidades de 1%, 2,5% e 4% do material em peso.

A lã de rocha tem como seus principais componentes os óxidos  $\text{SiO}_2$  (40,84%),  $\text{CaO}$  (27,89%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13,11%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (8,88%),  $\text{MgO}$  (6,46%) e  $\text{Na}_2\text{O}$  (1,22%). Mais da metade do material apresentou o tamanho de partícula de cerca de 106  $\mu\text{m}$ , enquanto que os grãos maiores não passavam de 1,4mm, pois foram peneirados numa peneira com este tamanho de abertura de malha. Já as fibras de sisal possuíam, em média, um comprimento de cerca de 70 mm.

O acréscimo de ambos os resíduos levou a redução do percentual de absorção de água do solo-cimento. Uma explicação para essa redução com acréscimo das fibras de sisal é que as fibras vegetais podem diminuir a propagação de trincas que se formam durante a secagem do solo-cimento, levando à redução dos vazios por onde a água entra durante o teste de absorção. Um efeito similar pode ser esperado com acréscimo das fibras de lã de rocha, sendo que este mineral ainda tem a vantagem de ser hidrofóbico. A presença da lã de rocha também leva à redução de porosidade dos blocos de solo cimento.

A lã de rocha levou ao aumento de resistência à compressão inicial com a adição de 1% de material. Porém, essa resistência foi diminuindo gradualmente com o aumento da quantidade de resíduo. A explicação para essa queda é a redução da hidratação do cimento com quantidades maiores de lã. Já o sisal aumentou a resistência à compressão à medida em que ele foi acrescentado ao solo-cimento, pois a fibra aumenta a resistência ao cisalhamento do material. Além disso, a fibra de sisal em uma superfície bastante rugosa, ao contrário da fibra lisa de lã de rocha, e esta rugosidade aumenta o atrito entre a fibra e os grãos de solo-cimento, aumentando a resistência à compressão. No sentido contrário, a lisura da fibra de lã de rocha faz com que ela deslize facilmente da matriz quando sujeita a esforços.

Um ensaio por difração de raios-X foi conduzido nas amostras reforçadas por fibras de sisal após os ensaios mecânicos. Nele ficou demonstrado que a sua composição mineralógica era similar àquela do solo-cimento sem a adição de resíduos, levando à conclusão de que o aumento na resistência mecânica se deveu apenas a presença das fibras.

#### **2.4.6. Cinza de secadores de grãos**

Silva *et al* (2020) utilizaram cinza de secadores de grãos no lugar de cimento nas proporções de 15% e 30% em massa. Esta cinza possui 60% de sua composição de sílica e 32% de outros óxidos, sendo o restante da composição matéria orgânica. O tipo de cura utilizado foi em câmara úmida, por 28 dias a cerca de 25°C. O solo foi caracterizado com relação à sua granulometria, e as massas de solo-cimento testadas em sua resistência à compressão e seus limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade).

Este trabalho mostrou haver dois mecanismos que influenciam a resistência à compressão quando é usado um resíduo com matéria orgânica. A adição de 15% de cinza se mostrou superior à amostra sem nenhum resíduo, pois a sílica da cinza ocupa os vazios da matriz cimentícia. No entanto, o material orgânico presente na cinza deixa vazios ao se decompor, e este efeito se mostrou predominante nas amostras com 30% de cinza, reduzindo a resistência à compressão do material. Apesar disso, todas as amostras mostraram resistência à compressão acima da exigida pela norma.

O solo se mostrou arenoso, atendendo à norma NBR 10833 com relação à granulometria. A adição de cinzas diminuiu os limites de Atterberg, pois o material não é

plástico. A maior quantidade de cinzas também fez com que o material precisasse de mais água para atingir a homogeneidade e trabalhabilidade necessárias.

#### **2.4.7. Cinza de bagaço de cana**

Moura *et al* (2021) também fizeram um trabalho com cinzas vegetais, mas utilizando bagaço de cana. Nela, as cinzas foram usadas como substitutas de parte do cimento na mistura para fabricação de tijolos nas proporções de 10%, 20% e 50%.

O solo para este trabalho foi retirado de uma profundidade de 50cm para evitar que o solo da superfície tivesse índices inaceitáveis de matéria orgânica. O tipo de solo usado era silte argiloso, de granulometria fina e grande proporção de argila. Nestes casos, a necessidade de adição de cimento para a estabilização da mistura é maior que em solos mais arenosos. Importante ressaltar que o solo utilizado nesta pesquisa tinha limites de plasticidade e liquidez maiores que os valores máximos exigidos pela norma. Apesar disso, os tijolos foram feitos e testados quanto à resistência à compressão e absorção de água.

A cinza diminuiu a resistência à compressão, pois ela foi aplicada no lugar do cimento, que é o principal responsável pela resistência mecânica no solo-cimento. Apesar disso, todas as formulações superaram o exigido pela norma. Em compensação, ela reduziu a absorção de água, por preencher os microporos da massa de solo-cimento. Todas as amostras também atenderam às normas neste quesito.

Gonçalves *et al* (2017) também fizeram um trabalho em que estudaram a influência da inserção de cinzas de bagaço de cana em massas para tijolo solo-cimento, substituindo parcialmente o cimento. A microscopia de varredura mostrou baixa porosidade, indicando boa adesão dos resíduos à matriz. Isso levou à diminuição da absorção de água à medida que a cinza era acrescentada, mas reduziu a resistência à compressão. No entanto, todas as amostras atenderam às normas em ambas as propriedades. A pesquisa também indicou que o aumento do tempo de cura (28 vs. 56 dias) aumenta a resistência à compressão dos materiais.

#### **2.4.8. Cinza de casca de arroz**

Rocha *et al.* (2021) estudaram os efeitos da adição de cinza de casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland em misturas de solo-cimento. As composições utilizadas continham 90% de solo, e as proporções totais de cimento e cinzas variaram em: 10% cimento/0% cinza; 7,5% cimento/2,5% cinza; e 5% cimento/5% cinza. Os materiais foram submetidos a ensaios de compressão e absorção de água, e seus resultados foram comparados com as normas brasileiras para blocos de solo-cimento.

O solo apresentava 65% de areia e 35% de argila e cal. A cinza apresentou mais de 90% de sílica, teor maior que o mínimo recomendado para sua substituição no cimento, de 80%.

O aumento do percentual de cinza de casca de arroz diminuiu a resistência à compressão. Apesar disso, todas as composições passaram nos critérios das NBRs de solo-cimento em todas as idades (que variaram de 7 a 56 dias). A redução observada foi causada pelo aumento de porosidade, consequente do aumento do percentual de cinzas. Todas as amostras também atenderam aos critérios de absorção de água. A adição de cinza aumentou a absorção de água, também devido ao aumento da porosidade do material.

#### **2.4.9. Cascas de arroz e de semente de braquiária**

As cascas dessas duas plantas foram adicionadas por Ferreira e Cunha (2017) em misturas de solo-cimento para substituir parcialmente o cimento. O solo utilizado na pesquisa era do tipo argiloso, e por este ter uma granulometria muito fina, misturou-se areia a ele. Além disso, as cascas foram tratadas com uma solução de cal hidratada a 5% para melhorar a sua compatibilidade com o cimento. Os tijolos foram curados por 7, 28, 56, 91 e 182 dias.

Apesar do tratamento com cal hidratada, a adição de cascas vegetais reduziu a resistência mecânica em todas as formulações por problemas de adesão de suas fibras à matriz cimentícia. No entanto, as formulações com substituição de 10% do cimento por casca de arroz e a de 10% por casca de semente de braquiária mostraram resistência mecânica dentro do exigido pela norma após 28 dias de cura. Abaixo de 28 dias, os ensaios com amostras com 7 dias de cura não alcançaram resistência à compressão satisfatória. Em todas as formulações, a propósito, o tempo de cura aumentou a resistência à compressão das amostras.

As formulações com cascas de semente de arroz mostraram resistência à compressão superior àquelas com cascas de semente de braquiária. Isso se deve por haver mais sílica na casca de arroz, que reage com o cimento e forma silicato de cálcio hidratado.

Todas as formulações apresentaram absorção de água satisfatória em relação ao determinado pela norma. Mas vale acrescentar que, quanto maior a quantidade de resíduos, menor a densidade aparente do material e, conseqüentemente, maior a absorção de água.

#### **2.4.10. Pó de serra**

Gonçalves *et al* (2017) fizeram um trabalho em que adicionaram pó de serra como substitutivo parcial ao cimento em tijolos solo-cimento. Os tijolos com resíduos apresentaram uma absorção de água menor que a de tijolos de solo puro e de tijolos de solo-cimento sem resíduos. O acréscimo de 10% de pó de serra diminuiu a resistência à compressão dos tijolos, mas eles atenderam às normas quanto no quesito resistência como na absorção de água.

#### **2.4.11. Areia diatomácea**

A areia diatomácea é composta de carapaça de organismos unicelulares vegetais, e este material foi obtido em processo de filtragem numa fábrica de cerveja. O principal componente dessa areia é a sílica hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Betsuyaku *et al* (2017) utilizaram o material como substituto parcial de solo e de cimento em tijolos de solo-cimento. O solo utilizado na pesquisa foi do tipo arenoso. As amostras foram curadas por 28 dias.

Os resultados mostraram que algumas amostras passaram nos critérios de resistência à compressão e absorção de água, mas levando em conta as médias das amostras, nenhuma das formulações passou em ambos os critérios simultaneamente. A única formulação que mostrou taxa de absorção de água de menos de 20%, feita com 10% do resíduo em substituição do solo, apresentou resistência mecânica de menos de 2 MPa. As outras 3 formulações (20% de resíduo em substituição do solo; 10% e 20% de resíduo em substituição do cimento) tiveram médias de resistência à compressão acima de 2 MPa, mas as médias de absorção de água ficaram acima dos 20% máximos permitidos pela norma.

#### **2.4.12. Casca de ovo**

Siqueira *et al* (2016) utilizaram casca de ovo em pó como resíduo sólido em substituição parcial de cimento misturas para tijolos solo-cimento. A principal substância da casca de ovo é a calcita.

O resíduo de casca de ovo reduziu a porosidade da mistura de solo-cimento, reduzindo a absorção de água das amostras. O material também serviu de reforço, aumentando a resistência à compressão do material. Ele foi adicionado para substituir até 30% do volume de cimento em massa, e todas as formulações atenderam às normas.

#### **2.4.13. Areia de fundição**

Leonel *et al* (2017) utilizaram areia de moldes de fundição descartada, provenientes de uma fábrica de motores. O solo utilizado nesta pesquisa era argiloso, e além do solo, resíduo e cimento, o material também levou areia comercial e pó de cascalho.

A areia dos moldes de fundição apresenta uma granulometria entre a areia comercial e a argila. A areia comercial é utilizada, inclusive, para reduzir a liquidez da argila, de granulometria muito fina. O pó de cascalho ajuda a manter boa resistência mecânica com o aumento da quantidade de argila na massa.

A areia de molde de fundição mostrou-se bem dispersa nos tijolos, reduzindo as porosidades e a absorção de água. No entanto, ao ser usada como substitutivo para a areia comercial, a resistência à compressão é reduzida, assim como a durabilidade dos tijolos. Apesar disso, todas as formulações testadas passaram nos critérios das normas tanto para absorção de água quanto para a resistência à compressão.

#### **2.4.14. Resíduos de tijolo de argila e de fibrocimento**

No trabalho realizado por Kongkajun *et al* (2020), o resíduo de tijolo substituiu o solo (laterita) em valores entre 10% e 50% e o resíduo de fibrocimento foi usado em substituição da mistura seca entre 5% e 10%.

O solo utilizado é predominantemente siltoso, com uma granulometria relativamente fina. Este trabalho foi realizado na Tailândia e não seguiu as normas brasileiras, mas os valores de limite de liquidez (29,03%) e de índice de plasticidade (4,51%) ficam dentro do indicado pela norma NBR 10833. Acrescentou-se areia na mesma proporção em todas as misturas de solo-cimento para compensar a granulometria do solo.

O resíduo de tijolo aumentou a resistência à compressão das amostras, mas permitiu mais absorção de água. O aumento da absorção acontece porque a massa do tijolo apresenta maior porosidade. A densidade aparente é menor, pois as partículas de tijolo são menos propensas à deformação e ao deslizamento, atrapalhando seu empacotamento e a densificação da massa. Apesar disso, o maior valor de absorção de água foi de aproximadamente 12%, que ficaria dentro da norma brasileira.

Com relação às amostras com resíduo de fibrocimento, elas tiveram também parte do cimento substituído. Ambas as propriedades analisadas para a validação de tijolos solo-cimento pioraram em relação às amostras sem resíduos, mas todas atenderam às normas brasileiras.

O resíduo de fibrocimento contém partículas de cimento já curado e fibras, o que reduz sua capacidade de coesão com o solo e o cimento. A redução da proporção de cimento

também contribuiu para a redução da resistência à compressão, pois o cimento é o maior contribuidor para a resistência após a hidratação e cura. A redução de cimento também levou ao aumento da porosidade nas amostras, que levou ao aumento da absorção de água.

Os melhores resultados de misturas com resíduos foram obtidos com a substituição de 10% do solo por resíduos de tijolos, mas a substituição se mostrou viável tecnicamente até os 50%.

#### **2.4.15. Resíduo granulado de borracha de pneu**

Silva *et al* (2017) utilizaram granulado de borracha para substituir parcialmente o solo (areia natural) utilizado na mistura para solo-cimento.

O trabalho mostrou que a adição de granulado de borracha aumentou a absorção de água e reduziu a resistência à compressão, mas todas as amostras atenderam às normas. O granulado não adere propriamente ao cimento, e o vazio que surge nesta interface permite a entrada de água. E como ele é feito de um material de baixa resistência à compressão, ele reduz significativamente (entre 50% e 70%) a resistência do tijolo. Outros trabalhos citados pelo autor já indicavam a redução da resistência à compressão com a adição de borracha independentemente de sua granulometria.

#### **2.4.16. Látex de borracha natural**

Jose e Kashturba (2021) estudaram o efeito da adição de látex natural de borracha em tijolos de solo-cimento cujo solo era a laterita. Na primeira parte do estudo, foram feitos testes para determinar o melhor traço de solo e cimento. Observou-se que com aumento na quantidade de cimento, aumenta-se a resistência à compressão, já que: 1) o cimento adquire uma capacidade de aglutinar as partículas do solo com a hidratação; 2) os produtos da hidratação do cimento são mais resistentes do que as partículas de solo; e 3) as partículas de cimento ocupam os espaços vazios entre as de solo por serem mais finas.

A absorção de água diminuiu com a adição da borracha, pois a borracha (que é hidrofóbica) substituiu parcialmente o solo (que é hidrófilo). Além disso, até certo ponto (3% de adição de látex), as partículas de borracha ocupam principalmente os vazios entre as partículas de solo. Acima deste valor (para as composições com 4% e 5% de borracha), as partículas de látex ocupam outras áreas da matriz, prejudicando o efeito ligante da pasta de cimento entre os grãos de solo. Já nas formulações com percentuais mais baixos de resíduos, o que predominou foi a capacidade da borracha de se deformar e suportar tensões de compressão, reduzindo a propagação de trincas internas. Por estes motivos, o estudo concluiu recomendando uma adição de látex em até 3%.

### **2.5. RESÍDUO DE ALUMINA**

O resíduo utilizado nesta pesquisa é a alumina ativada usada como leito de catalizador para a produção de poliolefinas. Esta seção apresenta a alumina, substância principal presente no resíduo, assim como o leito catalizador e como os resíduos de alumina podem ser usados na construção civil.

### 2.5.1. Alumina

O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), também conhecido como alumina, é um dos produtos químicos inorgânicos mais utilizados na indústria cerâmica e é produzido a partir da bauxita, que é seu único precursor em escala industrial. A bauxita é uma mistura de óxido de alumínio hidratado com impurezas de óxido de ferro, sílica e óxido de titânio, tendo origem na decomposição e intemperismo de rochas aluminosas em condições tropicais. A alumina é amplamente utilizada devido às suas propriedades, incluindo sua alta resistência e dureza, estabilidade térmica, resistência ao desgaste, bem como a estabilidade química a temperaturas elevadas. (CARTER; NORTON, 2007; VUKSIC *et al*, 2021).

Devido a estas propriedades, a alumina é usada para conter metal fundido ou em aplicações onde o material deve operar em altas temperaturas, assim como em aplicações que exijam alta resistência. Ela também é usada como substrato de baixa constante dielétrica para embalagens eletrônicas que abrigam chips de silício; em isoladores em velas de ignição; em aplicações de odontologia e medicina; em suportes de catalisador, na forma de partículas finas (ASKELAND; FULAY, 2009).

A transformação de bauxita em alumina se dá através do processo Bayer, que gera um produto nominal com 99,5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A alumina pode ser preparada em uma variedade de graus para atender a aplicações específicas. Os graus diferem pelo tamanho e forma dos cristais e pelo conteúdo de impurezas (CARTER; NORTON, 2007).

Uma quantidade considerável de resíduo de alumina é gerada durante o processo Bayer, que é capturada pelos precipitadores eletrostáticos usados na etapa de processamento da calcinação. Este resíduo possui alto teor de alumina (cerca de 90%), mas tem uma granulometria muito fina, o que impossibilita sua reutilização neste mesmo processo produtivo, fazendo com que ele seja normalmente descartado em aterros sanitários (GONÇALVES, *et al.*, 2016; MENEZES *et al.*, 2010). Este resíduo pode ser utilizado como matéria-prima secundária em formulações de pastas cerâmicas que podem ser usadas como base para a síntese da mulita como fase primária. A mulita é responsável por fornecer alta resistência mecânica e estabilidade térmica a altas temperaturas para materiais cerâmicos (DA SILVA *et al*, 2016).

A fórmula química da alumina é  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mas o material pode ser encontrado em diversas formas alotrópicas. São conhecidas 7 fases para esta substância: alfa ( $\alpha$ ), gama ( $\gamma$ ), eta ( $\eta$ ), teta ( $\theta$ ), delta ( $\Delta$ ), kappa ( $\kappa$ ), e chi (X). Dentre elas, a fase mais comum é a  $\alpha$ -alumina, que é a mais estável termodinamicamente (NICOLITE, M. 2017).

### 2.5.2. Leito de catalisador de alumina

Os leitos catalisadores funcionam por adsorção, que é um fenômeno que não deve ser confundido com a absorção. Na absorção, o líquido passa a fazer parte do volume do sólido, enquanto que na adsorção, o líquido adsorvido se associa a superfície do sólido adsorvente. A adsorção pode ser de dois tipos: a física, em que o líquido adere ao adsorvente por ligações de van der Waals, e a química, quando há reação e a formação de um composto na sua superfície (GOLLMANN, 2007).

A alumina usada como adsorvente é a alumina ativada, obtida a partir do alumínio tri-hidratado ( $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ ) através da desidratação térmica ou ativação. A capacidade de adsorção da alumina pode ser aumentada com a modificação de sua superfície (UOP, 2011).



A alumina ativada possui poros com mais de 50Å e área específica de cerca de 300m<sup>2</sup>/g. Ela pode ser usada na purificação de gases, como gás natural e GLP, e na purificação de fases líquidas. Alguns dos compostos que podem ser adsorvidos pela alumina ativada são: água, dióxido de carbono, álcoois, ácido sulfúrico, amônia e mercúrio (GOLLMANN, 2007; UOP, 2011).

Os adsorventes são muito utilizados na produção de poliolefinas, que formam o grupo de polímeros mais comercializado no mundo. Elas são produzidas a partir de olefinas (monômeros), como o propileno, que se torna polipropileno após o processo de polimerização. O esquema básico de produção de poliolefinas é: 1) adição de catalisador às olefinas; 2) reação dos monômeros; 3) separação e reciclagem do solvente, junto com o monômero que não conseguiu reagir; 4) adição de aditivos do polímero que será peletizado como produto final (GOLLMANN, 2007). O adsorvente à base de alumina usado na purificação de poliolefinas, patenteado por Garcin et al (1994), contém metais alcalinos ou alcalinos terrosos na proporção de 15 a 100 milimoles por 100 g de alumina.

Este adsorvente é usado para remover impurezas de poliolefinas preparadas pela polimerização de olefinas na presença de compostos de coordenação contendo metais. A polimerização de olefinas geralmente ocorre na presença de catalisadores que contêm metais das famílias 4B a 6B, como vanádio, titânio e zircônio. Há o risco, no entanto, de contaminação do polímero produzido por esses metais. A purificação da poliolefina é feita através do processo de adsorção utilizando alumina em forma de péletes. Além de remover impurezas do produto final, a alumina também purifica os solventes e monômeros contidos nas poliolefinas. Todos esses materiais voltam para os vasos de polimerização e por isso também precisam estar livres de contaminantes metálicos (Garcin *et al.*, 1994).

### **2.5.3. Uso de resíduos de alumina na construção civil**

López-Alonso *et al.* (2019) investigaram a adição de resíduo de alumina em agregados reciclados usados como base em pavimentação de estradas. Nesta pesquisa, a adição de resíduos de alumina a dois agregados reciclados diferentes aumentou a densidade e a resistência à compressão de ambos. A microscopia eletrônica de varredura mostrou também o surgimento de novos silicatos contendo alumínio nas misturas que continham resíduos de alumina, que podem ter sido formados pela reação de silicatos de cálcio semihidratados com resíduos de alumina. Esses novos silicatos podem ser um dos fatores que levou à melhoria das propriedades mecânicas dos agregados com resíduos de alumina. Esta pesquisa seguiu para escala real, onde foi feita a comparação entre cascalho, agregado reciclado, e agregado reciclado com resíduos de alumina (Cabrera *et al.*, 2021). Neste estudo, a combinação do agregado reciclado com a alumina mostrou ter maior capacidade de carga do que o cascalho, assim como a viabilidade do acréscimo deste resíduo no material de base de pavimentação de estradas. A única desvantagem do material com esta adição, é que ele demandou mais umidade para o preparo da massa.

Sua-iam e Makul (2017) investigaram o uso de resíduo de alumina como substituto de agregados finos (areia) em concreto autoadensável, além da substituição parcial de cimento por cinza volante. A utilização do resíduo de alumina em altos volumes aumentou significativamente a resistência à compressão do concreto. Também ficou demonstrada a

possibilidade da criação de um concreto autoadensável econômico e de alta resistência com adição do resíduo de alumina e cinzas volantes.

Herrero *et al.* (2016) investigaram a adição de escória de forno panela com alto teor de alumina como substituto parcial do cimento Portland usado em argamassas. Ficou demonstrado que o uso desta escória em substituição de até 20% do cimento não causou efeitos negativos nem na resistência mecânica, nem na trabalhabilidade das argamassas.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para a realização da pesquisa.

#### 3.1. MATERIAIS

##### 3.1.1. Solo

Foram testados dois solos diferentes. O primeiro, de aspecto mais argiloso, foi fornecido por uma empresa fabricante de tijolos ecológicos de solo-cimento, localizada em Salvador/BA. O segundo solo, de aspecto mais arenoso, foi adquirido no município de Ipirá/BA, sendo retirado de uma área distante cerca de 500m do Rio do Peixe, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu. A Figura 3.1 mostra os solos utilizados.

ACRESCENTAR A FIGURA DO SOLO ARENOSO

Figura 3.1 - Solo testado para a fabricação de corpos de prova de solo-cimento.



Fonte: Autoria própria.

Sob o aspecto visual, o solo argiloso apresentou grãos do tamanho de areias finas, sem a presença de material mais grosso, como areia grossa e cascalho. Sob o aspecto táctil, foi possível perceber haver uma boa quantidade de argila devido à sua boa capacidade de ser moldado e pela mancha deixada na pele da mão.

Já o solo arenoso tinha grãos do tamanho de areias grossas, e não deixava mancha na pele da mão, indicando pouca quantidade de argila. O material também se mostrou difícil de ser moldado. O aspecto de ambos os solos no exame táctil é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Exame táctil dos solos: a1-a4) argiloso e b1-b4) arenoso.



Fonte: Autoria própria.

### 3.1.2. Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CPII Z 32, que indica que ele é um cimento Portland composto com material pozolânico, de resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias de idade.

### 3.1.3. Alumina

A alumina é um resíduo proveniente do leito de catalisador da Braskem, localizada em Camaçari. O material é utilizado no processo de fabricação de polietileno para a remoção de catalisadores à base de titânio e vanádio por adsorção, e é mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Resíduo de alumina ativada.



Fonte: Autoria própria.

## 3.2.MÉTODOS

Toda a metodologia empregada neste trabalho pode ser sumarizada no fluxograma apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Fluxograma com toda a metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1. Caracterização do solo

O solo foi caracterizado por sua granulometria e por seus limites de Atterberg (limites de liquidez e de plasticidade). A granulometria se refere à distribuição dos grãos de solo em percentuais, de acordo com seus tamanhos. Já os limites de liquidez e de plasticidade são os percentuais de umidade (em peso) nos quais o solo mantém sua plasticidade; ou seja, os percentuais máximo e mínimo de água que um solo comporta enquanto mantém sua capacidade de ser modelado.

Porém, antes de realizar os ensaios de caracterização, as amostras foram preparadas de acordo com a norma *NBR 6457, Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*.

#### 3.2.1.1. Preparação de amostras de solo

O solo adquirido apresentou granulometria menor que 4,75mm, que é o valor adequado para a fabricação de tijolos solo-cimento. Isto foi verificado através de peneiramento na peneira de 4 mesh, que possui uma malha com abertura deste tamanho.

Depois, tomou-se 1kg de solo para a realização do ensaio de granulometria, já que o ele apresentava grãos menores que 5 mm. Esta quantidade segue o exigido na Tabela 3 da *NBR 6457*, reproduzida na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Quantidade de amostra para a análise granulométrica.

Dimensões dos órgãos maiores contidos na amostra, determinadas por observação visual (mm)	Quantidade mínima a tomar (kg)
< 5	1
5 a 25	4
> 25	8

Fonte: ABNT (2016 a).

### 3.2.1.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi feita de acordo com a norma *NBR 7181, Solo - Análise granulométrica*. Ela separa o peneiramento em dois tipos, o fino e o grosso. Neles são usadas as peneiras mostradas na Tabela 3.2, com o tamanho da abertura das peneiras dado em mm e em polegadas (até 1/8") ou mesh (para aberturas menores que 1/8"):

Tabela 3.2 - Peneiras usadas no ensaio de granulometria.

Tipo de peneiramento	Abertura das peneiras (mm)	Abertura das peneiras (polegadas ou mesh)
Peneiramento grosso	50 / 38 / 25 / 19 / 9,5 / 4,8	2" / 1.1/2" / 1" / 3/4" / 3/8" / 4
Peneiramento fino	2 / 1,2 / 0,6 / 0,42 / 0,25 / 0,15 / 0,075	10 / 16 / 30 / 40 / 60 / 100 / 200

Fonte: ABNT (2016 b).

Não havia peneira de abertura 0,25mm (60 mesh), então ela foi substituída pela peneira de tamanho mais próximo disponível, que foi 0,3mm (50 mesh).

Inicialmente, o solo foi separado em duas partes, uma para o peneiramento fino e outra para o peneiramento grosso, utilizando a peneira de 2mm. Antes disso, os torrões de solo foram desmanchados no almofariz com o auxílio de uma mão de gal, mostrados na Figura 3.5, para que apenas grãos soltos ficassem retidos na peneira. Em seguida, o solo retido foi lavado para se livrar do material fino aderido aos grãos maiores que 2mm.

Figura 3.5 - Almofariz e mão de gal.



Fonte: Autoria própria.

O solo utilizado nesta pesquisa passou integralmente pela peneira de 2mm, portanto esta lavagem não foi realizada e seguiu-se para o peneiramento fino.

Para este peneiramento, foram tomadas 120g do solo passante na peneira de 2mm e esta porção foi lavada na peneira de 0,075mm (200 mesh), para conseguir peneirar o material menor que este tamanho. A norma de fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento,

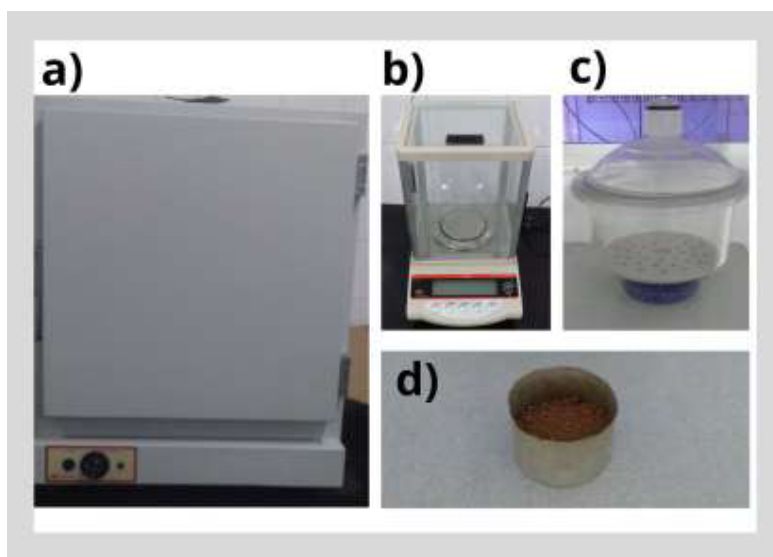
inclusive, utiliza o percentual de material passante na peneira de 200 mesh como critério para definir se o solo é próprio para a fabricação destes produtos ou não.

Em paralelo à lavagem, foram separadas 100g do material para calcular sua umidade. Este valor é necessário, pois o solo lavado retido na peneira de 200 mesh deve ser seco em estufa para a realização do peneiramento fino, e é preciso saber quando do material perdido na lavagem era a própria água retida no solo úmido.

O teor de umidade do solo foi calculado seguindo o Anexo A da NBR 6457. A mesma metodologia e equações foram usadas para calcular a umidade das amostras dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade, que serão descritos na seção 3.2.1.3.

Para calcular a umidade, foram usados: uma balança com capacidade de 200g e resolução de 0,01g; uma estufa (que atinja uma temperatura de pelo menos 105°C); dessecador com sílica-gel; e cápsulas metálicas onde são colocadas as amostras de solo para a secagem. Estes equipamentos são mostrados na Figura 3.6:

Figura 3.6 - a) estufa; b) balança digital; c) dessecador com sílica-gel e d) cápsula metálica.



Fonte: Autoria própria.

As 100g de solo foram pesadas junto com a cápsula metálica em que se encontravam. Esta massa foi chamada  $M_1$ , enquanto que o peso do recipiente puro foi anotado como  $M_3$ .

Em seguida, a amostra foi colocada na estufa numa temperatura entre 105°C a 120°C por 24h. Assim, ela perdeu toda a sua umidade e seu peso seco (junto com a cápsula) foi anotado como  $M_2$ . Importante ressaltar que, antes de pesar o material saído da estufa, ele foi posto num dessecador com sílica-gel para evitar que ele absorvesse umidade enquanto esfriava.

O teor de umidade ( $w$ ), em porcentagem, foi finalmente calculado pela Equação 3.1:

$$w(\%) = [(M_1 - M_2)/(M_2 - M_3)] \times 100\% \quad (3.1)$$

Voltando ao peneiramento, o ensaio em si foi realizado montando as peneiras em ordem de forma que a de maior abertura ficasse no topo e a de menor abertura embaixo, como mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Arranjo das peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.



Fonte: Autoria própria.

O resultado do ensaio é o percentual em massa de material retido em cada uma das peneiras, além da massa do material lavado na peneira de 200 mesh. A norma determina que o resultado seja apresentado como uma curva em que os diâmetros das partículas são colocados, em escala logarítmica nas abcissas, e os percentuais em escala aritmética nas ordenadas.

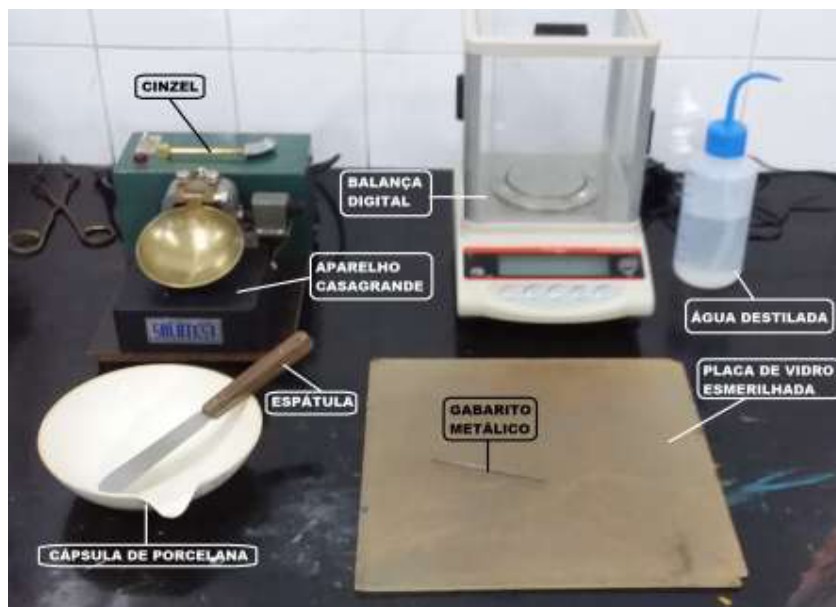
#### 3.2.1.3. Limite de liquidez e índice de plasticidade

O limite de liquidez e o índice de plasticidade foram calculados de acordo com as normas *NBR 6459, Solo — Determinação do limite de liquidez* e *NBR 7180, Solo — Determinação do limite de plasticidade*, respectivamente. Foram peneiradas 200 g de solo numa peneira de 0,42 mm de abertura (40 mesh). Metade do material passante deve ser usado em cada ensaio.

Os equipamentos utilizados no ensaio limite de liquidez foram: cápsula de porcelana e espátula de lâmina flexível para a homogeneização da pasta de solo; cinzel e aparelho Casagrande para abrir a ranhura e aplicar os golpes na pasta de solo, respectivamente. Esses materiais são apresentados na Figura 3.8, em conjunto com os equipamentos usados para realizar o ensaio de plasticidade:



Figura 3.8 - Equipamentos necessários para a realização dos ensaios de liquidez e plasticidade.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo a norma NBR 6459, foi criada uma pasta homogênea através da adição gradual de água destilada a 100g de solo, como mostra a Figura B. O tempo de homogeneização foi de 15 minutos, misturando a água ao solo vigorosamente. A pasta foi então transferida para a concha do aparelho Casagrande, cobrindo cerca de 2/3 da concha nivelando a pasta com a altura da concha, como mostra a Figura 3.9.

Figura 3.9 - a) Pasta obtida pela homogeneização do solo com água destilada; e b) pasta de solo cobrindo a concha do aparelho Casagrande.



Fonte: Autoria própria.

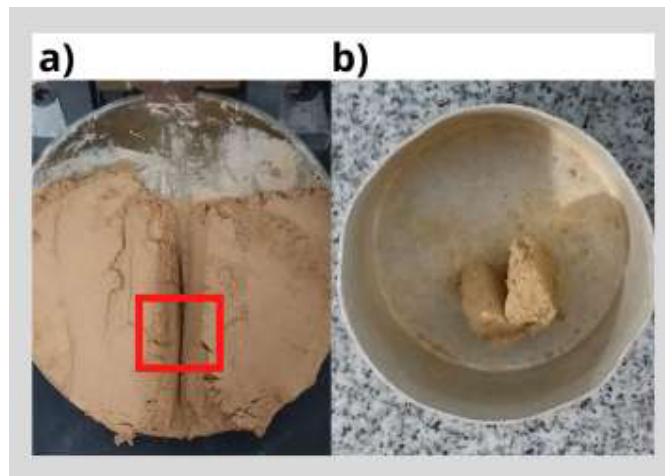
Depois disso foi feita uma ranhura na pasta com um cinzel e a concha foi colocada no aparelho Casagrande. Nele, a concha deve cair repetidamente de uma altura de 10 mm, sendo aplicados 2 golpes por segundo. A cada golpe dado, a pasta escoar um pouco para o centro, fechando a ranhura gradualmente.

Segundo a norma, no primeiro ponto de umidade da amostra, a ranhura deve se fechar ao longo de 13 mm (ou cerca de  $\frac{1}{3}$  da ranhura) com 30 a 35 golpes, sendo este é o ponto do ensaio onde a amostra tem a menor umidade. Se só for possível fechar a ranhura por este comprimento com mais de 35 golpes, isso significa que a amostra está muito seca e um pouco mais de água deve ser adicionada a ela.

Após o primeiro ponto, deve-se incorporar um pouco mais de água à massa e homogeneizá-la novamente, isso gerará novos pontos em que a pasta se fechará com um número menor de golpes. A norma diz que pelo menos mais dois pontos de umidade, equivalentes a pontos que caíam num intervalo de 30 a 15 golpes.

Cada vez que a pasta se fechava dentro dos limites de golpes estabelecidos pela norma, uma pequena porção da pasta do meio da ranhura era retirada e guardada numa cápsula para a determinação do seu teor de umidade naquele ponto, como mostra a Figura 3.10.

Figura 3.10 - a) local onde a ranhura na pasta está fechada e de onde a amostra foi retirada; b) amostra dentro da cápsula metálica.



Fonte: Autoria própria.

A norma diz que o cálculo do limite de liquidez deve ser feito a partir da construção de um gráfico em que o eixo das ordenadas apresenta o número de golpes (em escala logarítmica) e o das abscissas apresenta o percentual de umidade de cada ponto (em escala aritmética). Os pontos devem ser ajustados por uma reta, e o teor de umidade equivalente a 25 golpes nesta reta é o limite de liquidez.

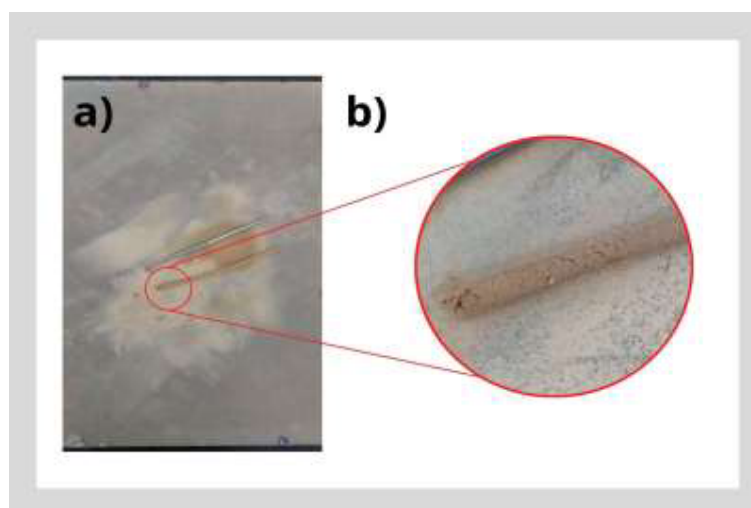
As outras 100g do solo peneirado foram usadas para calcular o limite e o índice de plasticidade. O solo foi misturado com água destilada e homogeneizado da mesma forma como fora feito no preparo da pasta para o ensaio de limite de liquidez.

Os materiais utilizados no ensaio de liquidez foram uma placa de vidro esmerilhada e um gabarito metálico de 3mm de diâmetro por 100mm de comprimento (mostrados

anteriormente na Figura 3.8, além da cápsula de porcelana e espátula usadas para a homogeneização da massa.

Depois que a massa foi homogeneizada, foi retirada uma quantidade de cerca de 10g para fazer uma bola na mão, que em seguida foi modelada sobre a placa esmerilhada em forma de cilindro de 3mm de diâmetro por 100mm de comprimento, como mostra a Figura 3.11. No destaque da mesma, mostra-se o ponto de ressecamento da massa, que é o ponto em que a umidade foi calculada. Quando esse ponto foi atingido, o cilindro foi colocado imediatamente em uma cápsula e pesado para o cálculo de umidade, assim como foi feito para o limite de liquidez.

Figura 3.11 - Massa de solo a) ao lado do gabarito e b) detalhe mostrando seu ressecamento.



Fonte: Autoria própria.

A norma diz que se a massa se romper antes de formar um cilindro de 3 x 10mm, ela deve voltar para o recipiente de porcelana para ser homogeneizada com mais água, pelo tempo mínimo de 3 minutos, pois ela está muito seca para ser plástica. Porém, se ao atingir esse tamanho ela não se ressecar, é sinal que ela está muito úmida, devendo ser colocada de volta no recipiente de porcelana e misturada novamente, mas agora sem adição de água, pois isso fará com que ela perca o excesso de umidade.

Foram moldados 5 cilindros para o ensaio a partir da mesma massa, gerando um total de 5 pontos para a medição do limite de plasticidade. Segundo a norma, em pelo menos 3 desses pontos o limite de plasticidade medido não deve diferir em mais de 5% da média entre eles.

O índice de plasticidade, que é um dos índices de caracterização dos solos, é determinado pela Equação 3.2:

$$IP = LL - LP \quad (3.2)$$

onde:

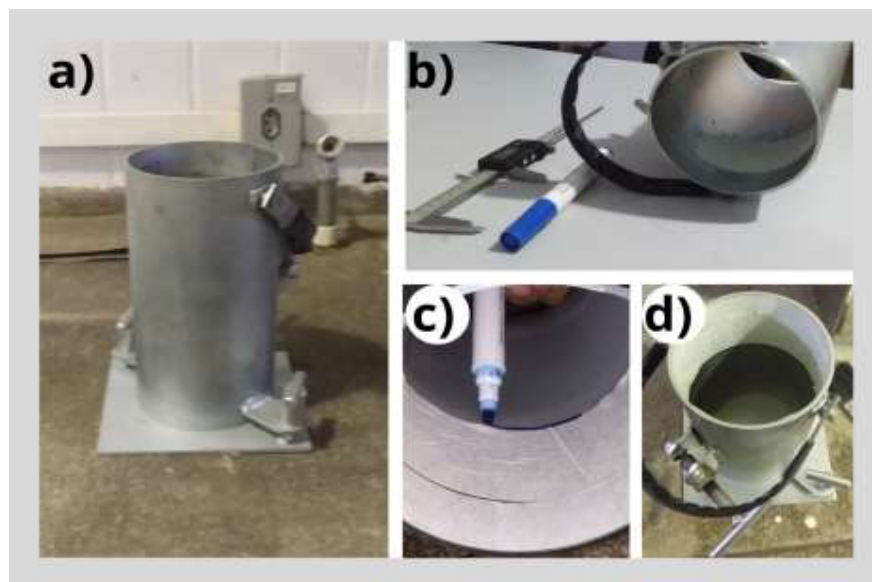
*IP* - índice de plasticidade;  
*LL* - limite de liquidez;  
*LP* - limite de plasticidade.

### 3.2.2. Preparação de corpos de prova de solo-cimento

A norma *NBR 12024, Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento*, mostra que o molde de corpos de prova de solo-cimento devem ser cilíndricos e ter dimensões de 127,3 mm de altura por 100 mm de diâmetro.

Neste trabalho foram usados moldes cilíndricos para concreto, que têm as dimensões de 200 mm de altura por 100 mm de diâmetro. Por este motivo, os cilindros foram marcados internamente até a altura correta dos corpos de prova, como mostra a Figura 3.12:

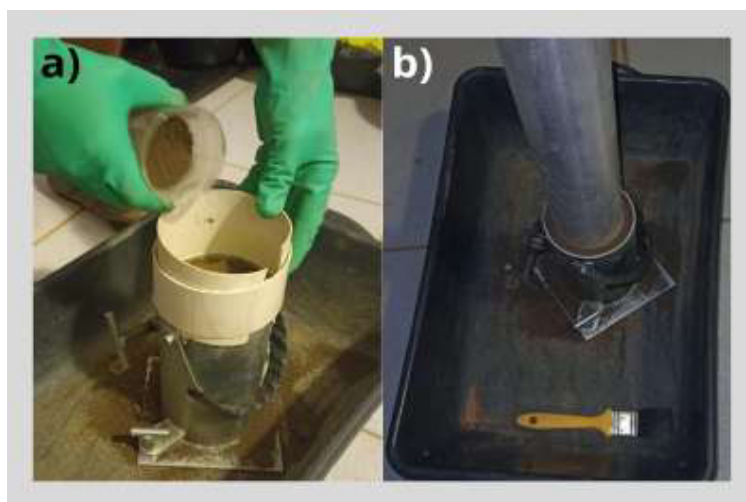
Figura 3.12 - a) Forma de concreto e b-d) etapas de marcação da forma.



Fonte: Autoria própria.

O material deve ser compactado em duas camadas, sendo recomendada a escarificação do topo da primeira camada para auxiliar na aderência da segunda. Ele foi compactado utilizando-se um tarugo de alumínio, como mostra a Figura 3.13. A mesma quantidade de massa foi utilizada em cada amostra, tomando-se cuidado para que todos os CPs tivessem o mesmo tamanho ao fim de cada compactação.

Figura 3.13 - a) Preenchimento e b) compactação do corpo de prova na forma.



Fonte: Autoria própria.

Foram fabricadas 4 composições diferentes de material, para verificar a influência da adição de resíduo de alumina no solo-cimento, variando o percentual de resíduo em relação à massa do solo. Os percentuais foram 0% (usado como referência para comparação), 5%, 10% e 15%. O traço da proporção de solo e cimento utilizado foi de 8:1 em volume (solo mais resíduo:cimento), pois este é utilizado em uma empresa de fabricação de tijolos ecológicos. A Tabela 3.3 abaixo mostra as quantidades relativas para cada composição em volume. Note que a soma das quantidades de solo mais resíduo é sempre a mesma (oito nonos do total), e por isso a quantidade de cimento é invariável entre as composições (um nono).

Tabela 3.3 - Quantidade relativa de solo, resíduo e cimento por composição.

Composição	Solo	Resíduo	Cimento	Volume total
00%	0,889	0,000		
05%	0,845	0,044		
10%	0,800	0,089	0,111	1
15%	0,756	0,133		

Fonte: Autoria própria.

O material moldado deve seguir para ser curado em câmara úmida. Neste trabalho, a câmara úmida foi substituída por regar o material duas vezes ao dia por 5 dias seguidos, seguido pelo recobrimento dos corpos de prova com material plástico, como é feito em indústrias de tijolos de solo-cimento. Este processo é mostrado na Figura 3.15. Esta prática garante que o material fique constantemente umedecido durante o período de cura. O período entre a cura e o ensaio recomendado pela empresa consultada é de 7 dias.

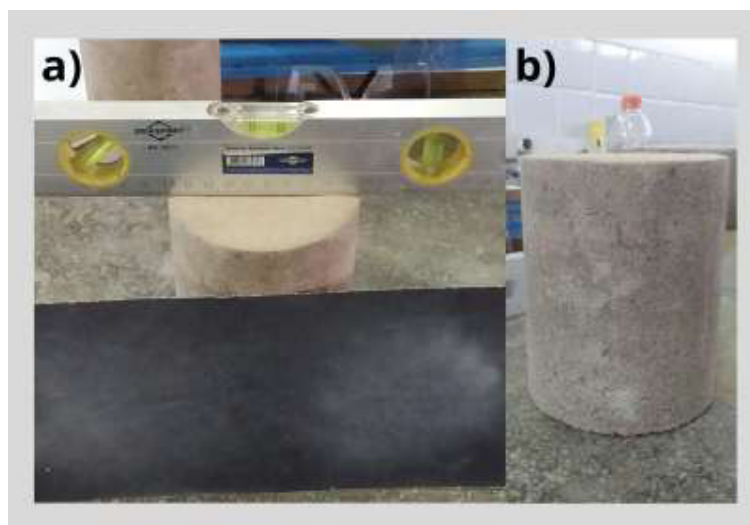
Figura 3.14 - Processo de cura dos corpos de prova: a) regagem, b) cobertura com plástico e c) corpo de prova curado.



Fonte: Autoria própria.

Após a cura, os corpos de prova precisaram ser retificados. Esse processo foi feito por lixamento, usando-se um nível para garantir que o topo e a base do corpo de prova não apresentavam inclinação em relação ao eixo central do cilindro, como mostra a Figura 3.15. Esse passo é fundamental para preparar os corpos de prova para o ensaio de compressão.

Figura 3.15 - a) Corpo de prova retificado, nível e lixa (80 ou 100) e b) aspecto final do corpo de prova de solo-cimento.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.3. Determinação de resistência à compressão

A *NBR 12025, Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - método de ensaio*, diz que o ensaio de compressão deve ser feito em uma máquina de ensaios universal, a uma velocidade de 1mm/min. O corpo de prova deve ser imerso em água por 4h, como mostra a Figura 3.16, retirado imediatamente antes do ensaio e enxuto com superficialmente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.16 - Corpos de prova submersos em caixa com água.

Em seguida, o corpo de prova deve ser colocado na máquina de ensaios de forma ao eixo vertical do mesmo ficar alinhado ao eixo vertical da máquina, como mostra a Figura 3.17.

Figura 3.17 - Corpo de prova na máquina de ensaios universal.



Fonte: Autoria própria.

O diâmetro e a altura dos corpos de prova devem ser anotados e inseridos no programa da máquina com resolução de 0,1 mm e 1 mm, respectivamente. A carga máxima mostrada no ensaio deve ser registrada como a carga de ruptura com resolução de 50N. A tensão de ruptura é o valor desta carga dividida pela área da seção transversal do corpo de prova, sendo registrada com aproximação de 0,1 MPa.

### 3.2.4. Determinação do teor de absorção de água

A NBR 13555, *Solo-cimento - Determinação do teor de absorção de água*, determina que um mínimo de 2 corpos de prova cilíndricos sejam moldados de acordo com a NBR 12024 para a realização deste ensaio.

O ensaio é simples e deve ser feito levando os corpos de prova curados para uma estufa até a estabilidade da massa, como mostra a Figura 3.18.

Figura 3.18 - Corpos de prova de solo-cimento na estufa.



Fonte: Autoria própria.

Quando esta é atingida, anota-se o valor da massa seca do material,  $m_1$ . Depois, os corpos de prova deverão ser imersos em tanques por 24h para absorverem a água. Quando eles forem retirados, deverão ser enxutos com panos úmidos e pesados antes de passarem-se 3 minutos de enxutos. Esta pesagem dá o valor de  $m_2$ , que é a massa do corpo de prova úmido.

O teor de absorção de água ( $A$ ) é dado em percentual através da Equação 3.3:

$$A = [(m_2 - m_1)/(m_1)] \times 100\% \quad (3.3)$$

### 3.2.5. Composição do resíduo de alumina

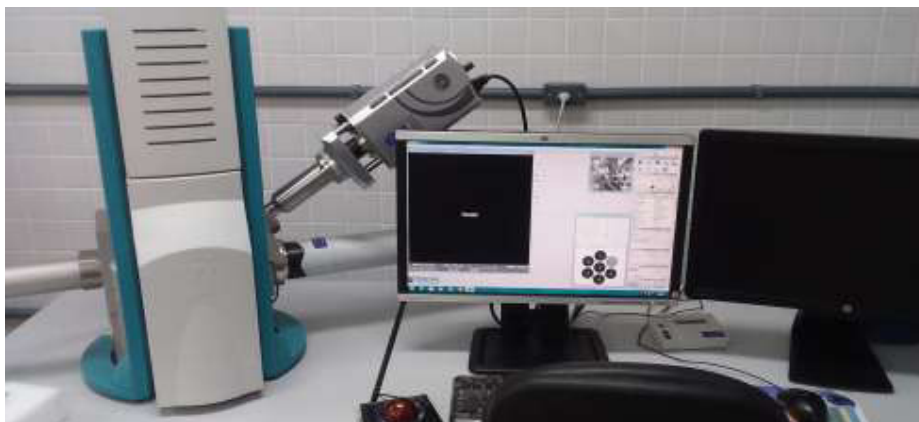
A composição do resíduo de leito de catalisador foi fornecida pela empresa Braskem, localizada em Camaçari/BA.



### 3.2.6. Microscopia eletrônica de varredura

O solo, a alumina, e os materiais dos tijolos foram analisados visualmente por microscopia eletrônica de varredura. O microscópio utilizado foi o modelo VEGA, da empresa Tescan, mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autoria própria.

As amostras foram retiradas das regiões de fratura dos corpos de prova após o ensaio de compressão. Elas foram então recobertas com ouro em câmara de vácuo no aparelho modelo Q150R ES da marca Quorum, para se tornarem condutoras e puderem ser observadas pelo MEV. O recobrimento é mostrado na Figura 3.20.

Figura 3.20 - Recobrimento das amostras de solo-cimento para o MEV.



Fonte: Autoria própria.

No Capítulo 4 a seguir serão analisados todos os resultados obtidos nos ensaios apresentados neste Capítulo 3.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelos ensaios descritos no Capítulo 3. Em primeiro lugar, serão analisados os resultados dos ensaios de granulometria, liquidez e plasticidade dos solos, que determinam se os solos adquiridos para a pesquisa são viáveis ou não para o preparo de misturas de solo-cimento.

Em seguida, os resultados dos ensaios físicos (compressão e absorção de água) serão discutidos à luz da microestrutura observada através da microscopia eletrônica de varredura. Os primeiros servem para validar a viabilidade do uso das massas acrescidas de resíduo de alumina como material para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento. Já a análise microestrutural serve para justificar o comportamento observado nos ensaios físicos, servindo de base para aprimoramentos e estudos futuros.

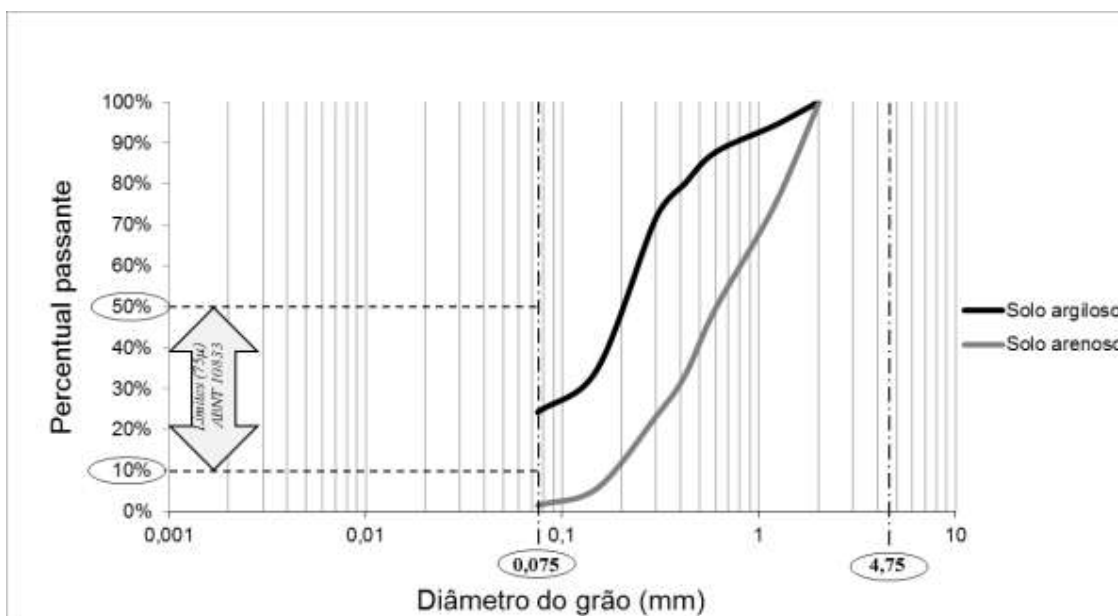
### 4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A NBR 6457/2016 indica que o solo utilizado em tijolos de solo-cimento deve passar 100% pela peneira de 4 mesh (4,75 mm) e entre 10 e 50% deve passar pela peneira de malha 200 mesh (0,075 mm).

#### 4.1.1. Granulometria do solo

Foram testados dois solos, um de aspecto mais argiloso e um mais arenoso. A curva granulométrica de ambos é mostrada na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Curva granulométrica dos solos utilizados.



Fonte: Autoria própria.

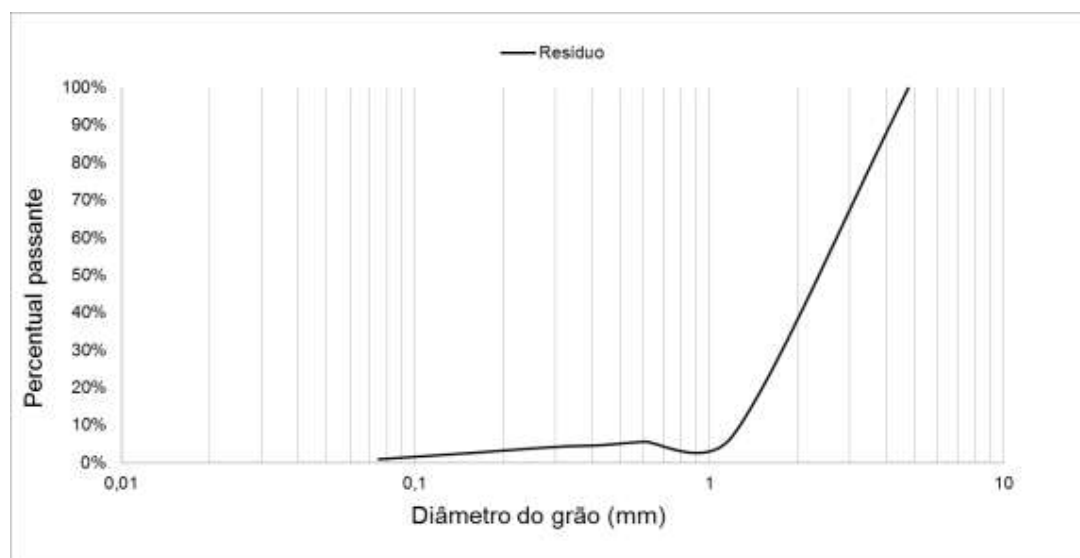
O gráfico mostra que em ambos os solos todo o material passou pela peneira de 10 mesh (2 mm). Portanto, os dois materiais atendiam ao critério da NBR 10833, que é o de passar integralmente pela peneira de 4 mesh (4,75 mm).

O segundo critério da norma com relação à granulometria é a passagem de 10% a 50% do solo pela peneira de 200 mesh (0,075 mm). Neste caso, o solo argiloso atendeu ao critério, com 24,29% de seu conteúdo (em massa) passando pela peneira. Já o segundo solo, arenoso, não atendeu ao critério, tendo apenas 1,54% de material passante por esta peneira.

#### 4.1.2. Granulometria do resíduo

O resíduo apresentou uma granulometria bastante homogênea, com 92,86% do material sendo retido pela peneira de 16 mesh (1,2 mm). Sua curva granulométrica é mostrada na Figura 4.2.

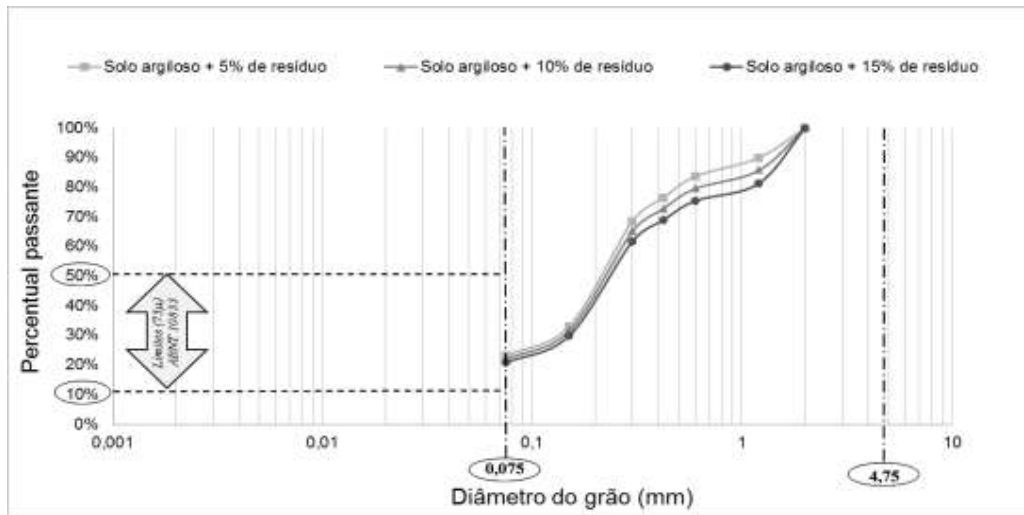
Figura 4.2 - Curva granulométrica do resíduo.



Fonte: Autoria própria.

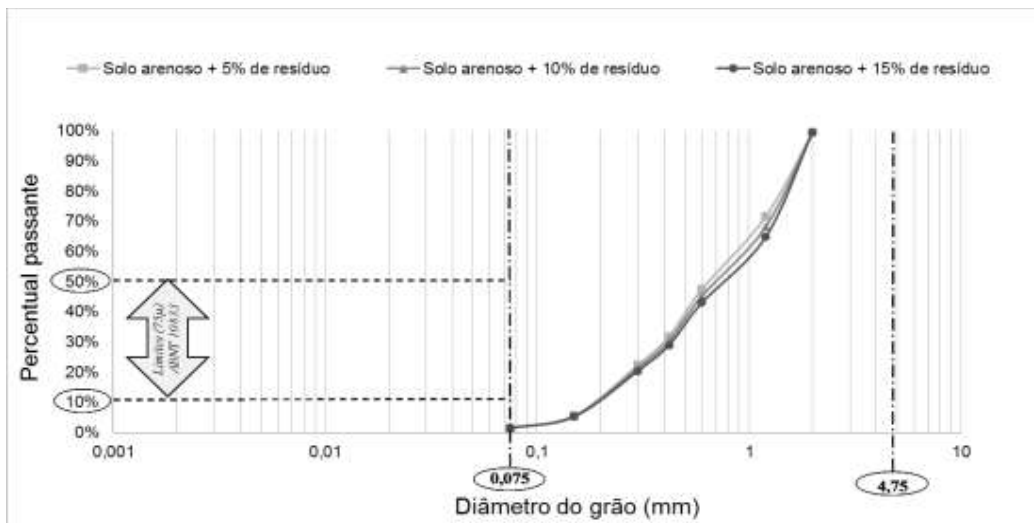
A adição de resíduo aos solos alterou levemente suas curvas granulométricas, como é mostrado nas Figuras 4.3 e 4.4. As curvas mostram que a adição dos resíduos nas proporções de 5%, 10% e 15% mantiveram o solo argiloso dentro dos critérios estabelecidos pela NBR 10833, e o solo arenoso fora.

Figura 4.3 - Curvas granulométricas do solo argiloso com a adição de resíduo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.4 - Curvas granulométricas do solo arenoso com a adição de resíduo.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2. LIMITE DE LIQUIDEZ E ÍNDICE DE PLASTICIDADE

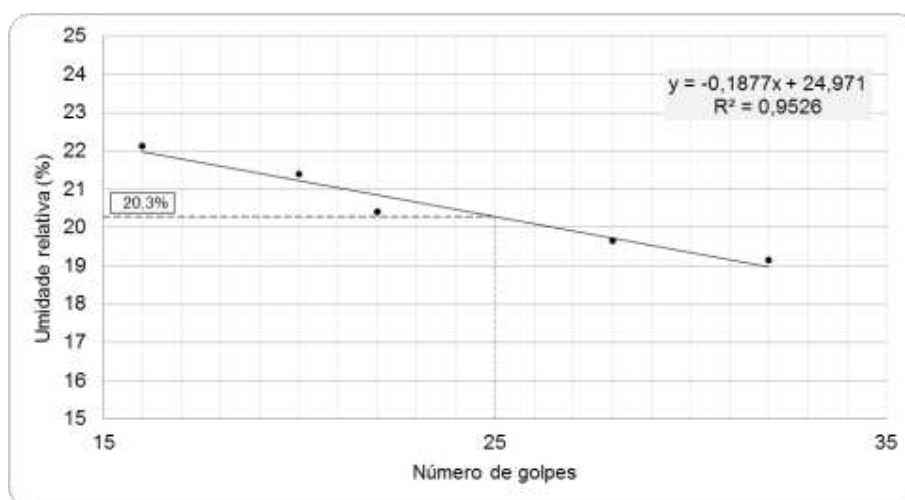
Os limites de liquidez e os índices de plasticidade foram calculados de acordo com as normas NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente.

O solo arenoso mostrou dificuldade em manter a ranhura aberta com o cinzel nos primeiros golpes, mesmo com a redução da umidade. Devido a essa impossibilidade, a NBR 6459 determina que deve-se considerar que o solo não apresenta limite de liquidez (NL). Também não foi possível moldar um cilindro de 3mm de diâmetro por 10mm de

comprimento, o que indica que o solo não apresenta limite de plasticidade (NP), segundo a NBR 7180. A mesma norma também diz que, qualquer um desses limites não pode ser calculado, o índice de plasticidade deve ser anotado como “(NP), não plástico”.

No caso do solo argiloso, foi possível calcular tanto os limites de liquidez quanto o de plasticidade, e consequentemente, seu índice de plasticidade. O limite de liquidez é dado pelo teor de umidade, em percentual de massa, da amostra de solo quando esta se fecha com 25 golpes dados no aparelho Casagrande. Porém, durante o ensaio, a amostra se fecha com uma quantidade de golpes que varia de 15 a 35, mas não necessariamente com 25 golpes. Por este motivo, deve-se plotar uma reta com pelo menos cinco pontos obtidos no ensaio, e esta deve ser utilizada para encontrar a umidade com 25 golpes. A Figura 4.5 mostra o gráfico plotado a partir dos cinco pontos obtidos durante o ensaio de liquidez, com o teor de umidade referente aos 25 golpes em destaque.

Figura 4.5 - Número de golpes vs. teor de umidade, obtidos para o solo argiloso.



Fonte: Autoria própria.

Para se obter o valor com exatidão, foi gerada a Equação 4.1 no Excel, obtida pela linha de tendência do tipo linear do programa. Ela também é mostrada na Figura 4.5 junto ao gráfico. A Equação 4.1 é dada por:

$$w(G) = -0,1877 \cdot G + 24,971 \quad (4.1)$$

Sendo:

$w$  - teor de umidade em peso;

$G$  - número de golpes.

Substituindo  $G$  por 25 golpes, obteve-se o teor de umidade de 20,3%, que é o limite de liquidez do solo. A norma determina também, no entanto, que o resultado deve ser representado pelo número inteiro mais próximo, ou seja, o limite de liquidez é igual a 20%.

Em seguida, foi calculado o limite de plasticidade através das médias dos teores de umidade obtidos em cinco pontos do ensaio de plasticidade do solo. Estes resultados são mostrados na Tabela 4.1. A NBR 7180 diz que pelo menos três dos teores de umidade obtidos não podem diferir de sua média em mais de 5%. No ensaio realizado, todos os 5 valores atenderam a este critério, e isto também é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Teores de umidade obtidos no ensaio de plasticidade.

$w$ (%)	$w_{\text{médio}}$ (%)	Divergência em relação à média (%)
14,754		3,06%
15,677		3,00%
15,137	15,220	0,54%
15,421		1,32%
15,109		0,73%

Fonte: Autoria própria.

A norma determina que o limite de plasticidade é o valor desta média, expresso em porcentagem, aproximando-se este valor do inteiro mais próximo. Portanto, o limite de plasticidade do material é igual a 15%. Por fim, calcula-se o índice de plasticidade através da Equação 4.2, também dada pela NBR 7180.

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq. 4.2}$$

Sendo:

$IP$  - índice de plasticidade;  
 $LL$  - limite de liquidez;  
 $LP$  - limite de plasticidade.

Assim, o índice de plasticidade do solo argiloso é igual a 5%.

### 4.3. ADEQUAÇÃO DOS SOLOS À NBR 10833

Os resultados dos ensaios de granulometria, liquidez e plasticidade para os dois solos estão sumarizados na Tabela 4.2, que também mostra se o material atende ou não ao critério da norma.

Tabela 4.2 - Avaliação dos solos testados de acordo com os critérios da NBR 10833.

CRITÉRIO	LIMITES	SOLO ARGILOSO		SOLO ARENOSO	
		RESULTADO	VALIDAÇÃO	RESULTADO	VALIDAÇÃO
Peneira de 4,75 mm	100%	100%	APROVADO	100%	APROVADO
Peneira de 0,075 mm	de 10% a 50%	24,29%	APROVADO	1,54%	REPROVADO
Limite de liquidez	≤ 45%	20%	APROVADO	NL	REPROVADO
Índice de plasticidade	≤ 18%	5%	APROVADO	NP	REPROVADO

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados apresentados, o solo argiloso é adequado para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento, enquanto que o solo arenoso é inadequado.

#### 4.4. COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE ALUMINA

A Tabela 4.3 mostra a composição do resíduo de alumina. Nela, podemos observar o alto teor de alumínio do material, que era esperado dado ao tipo de leito de catalisador utilizado. Também há presença de titânio e vanádio, provenientes do catalisador usado na produção de poliolefinas. As demais substâncias são impurezas que surgem no processo de fabricação destes polímeros.

Tabela 4.3 - Análise de composição química feita por FRX.

Substância	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Outros
Percentual	4,6	1	76,92	3,15	10,09	3,75	0,13	0,31	0,05

Fonte: Autoria própria.

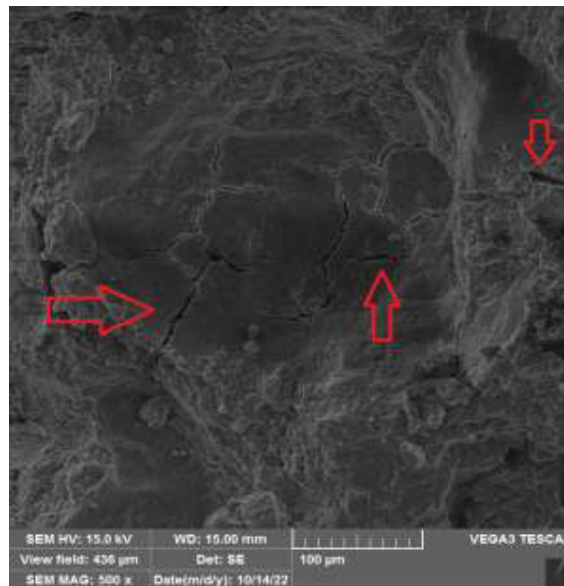
#### 4.5. MEV

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para analisar a microestrutura dos corpos de prova de solo-cimento. As amostras foram retiradas das regiões da fratura, após os ensaios de compressão. A microestrutura do material ajuda a explicar porque o solo-cimento com a adição de resíduos apresentou o comportamento que será mostrado nas subseções seguintes.

##### 4.5.1. Corpos de prova com 0% de resíduo

A Figura 4.6 mostra a matriz argilosa numa região onde não se vê microconstituintes do cimento. Nela podem ser vistas trincas, provavelmente causadas pelo ensaio de compressão.

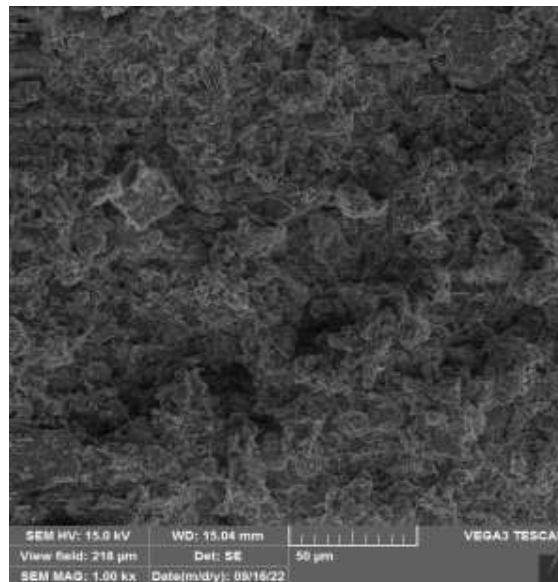
Figura 4.6 - Trincas nos corpos de prova de solo-cimento puro, indicadas pelas setas.



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram regiões cobertas por cimento. Na Figura 4.7, a camada de cimento (acinzentada) recobre toda a matriz argilosa, que apresenta algumas trincas e porosidade.

Figura 4.7 - Cristais de material cimentício recobrindo matriz de argila.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.8, é possível perceber a presença de gel de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). A forma de gel é devida à baixa cristalinidade desse microconstituente. Apesar disso,



o C-S-H é o principal responsável pelo ganho de resistência do solo quando ele é reforçado por cimento.

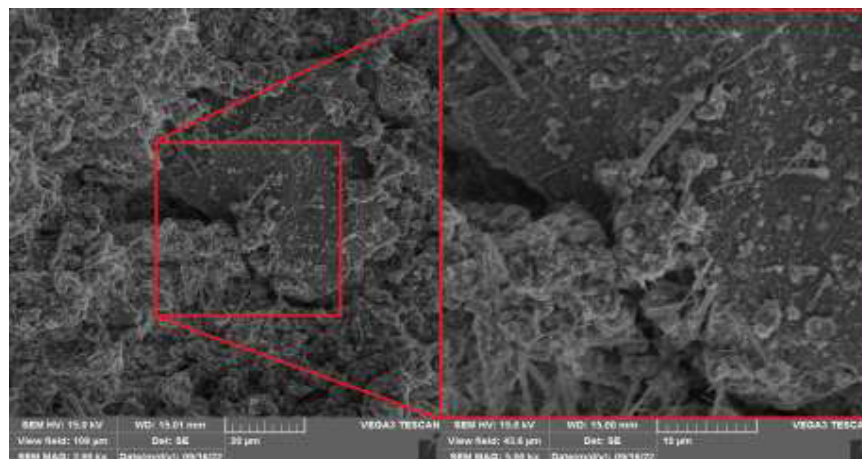
Figura 4.8 - Gel de C-S-H sobre matriz de argila, circulado de vermelho.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.9 mostra outro micro constituinte do cimento, desta vez uma fase cristalina. Esta fase em formato acicular é a etringita (AFt). O destaque da imagem mostra como o cimento formou uma "ponte" ligando os dois lados de uma trinca na matriz argilosa, sendo indicativo de sua resistência superior à do solo que ele recobre.

Figura 4.9 - Cristais de etringita recobrindo trincas.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.5.2. Corpos de prova com 5% de resíduo

A Figura 4.10 mostra duas partículas do resíduo de alumínio incrustadas na matriz de solo cimento. Nota-se que a adesão da partícula à matriz é baixa pela extensão dos vazios em suas interfaces partícula/matriz. Além disso, há bastante trincas por toda a superfície da amostra.

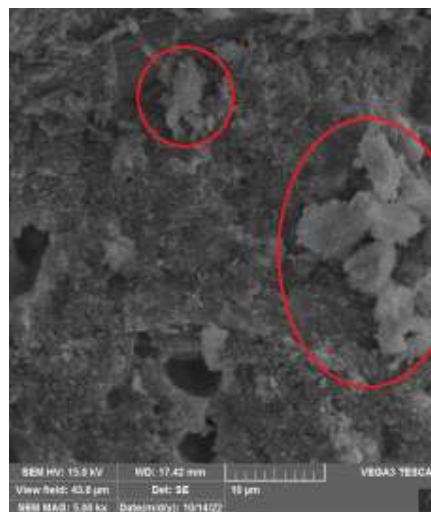
Figura 4.10 - Resíduos de alumina incrustados em matriz de solo-cimento.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.11 mostra grãos de gel de C-S-H recobrando a matriz de argila. É possível observar também a presença de poros no quarto inferior esquerdo da imagem.

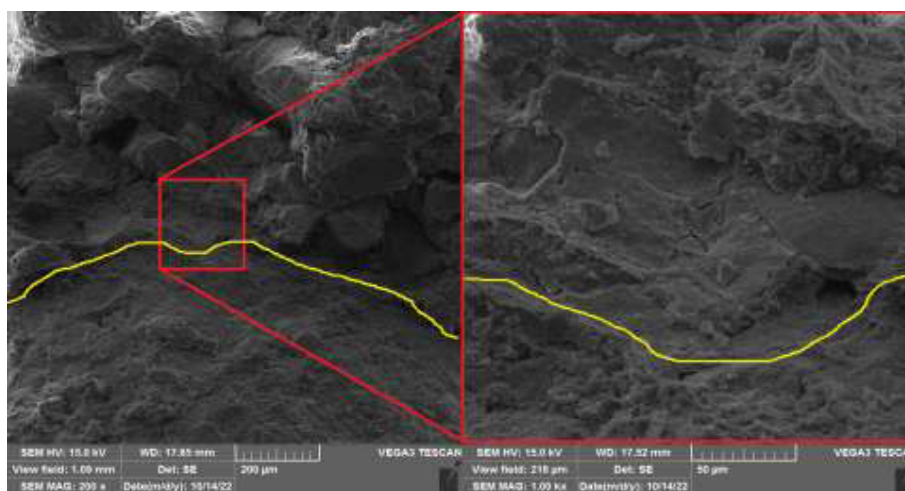
Figura 4.11 - Gel de C-S-H sobre a matriz argilosa, circulado em vermelho.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.12 mostra uma área onde houve uma boa aderência do resíduo (região abaixo da linha amarela) ao solo. Há uma continuidade entre um e outro e esta boa adesão se deve apenas à compactação, dado que não há reação entre os constituintes da alumina e do solo.

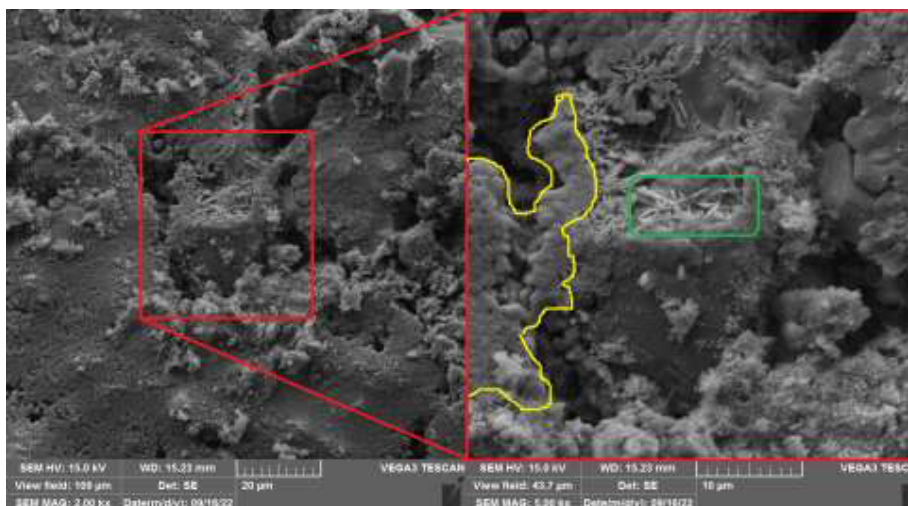
Figura 4.12 - Interface entre o resíduo e a matriz de solo-cimento, destacada em amarelo.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.13 mostra duas fases distintas do cimento: o gel C-S-H, destacado em amarelo, e a etringita, com sua forma acicular destacada em verde. Observa-se aqui como o cimento recobriu a região mesmo através das trincas, como fica evidente na área em que o gel de C-S-H está destacado.

Figura 4.13 - produtos do cimento: gel C-S-H (em amarelo) e etringita (em verde).

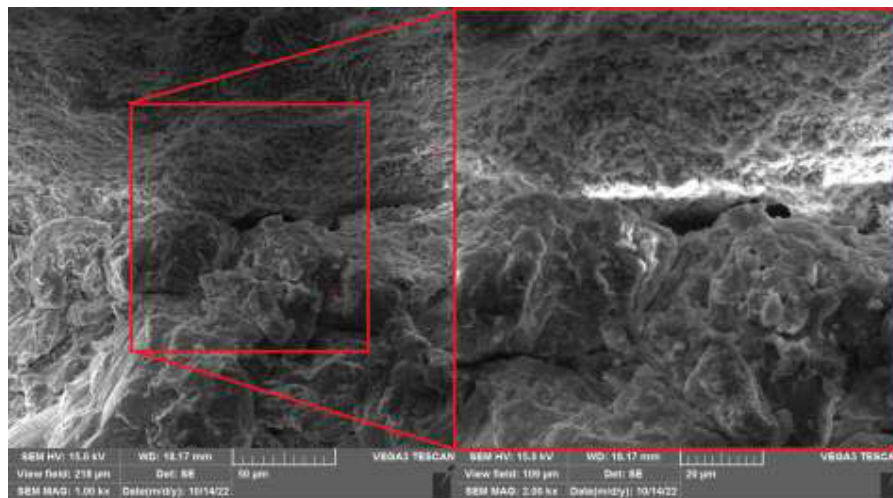


Fonte: Autoria própria.

#### 4.5.3. Corpos de prova com 10% de resíduo

A Figura 4.14 mostra uma região de interface entre o resíduo (metade superior) e a matriz de solo cimento (metade inferior). Em destaque na imagem, uma área com um vazio entre os dois materiais.

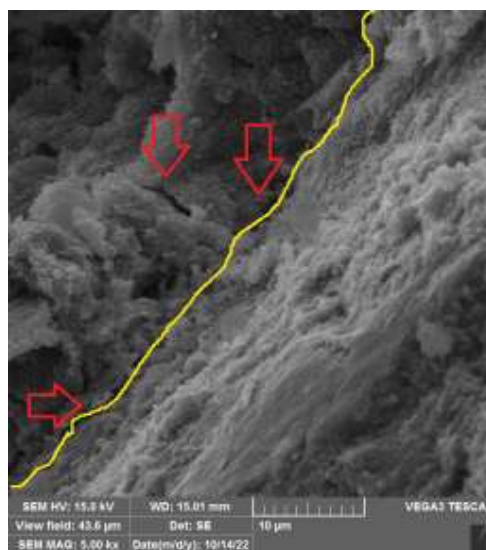
Figura 4.14 - Interface entre resíduo e matriz de solo-cimento.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.15 mostra outra região de contato entre o resíduo (abaixo e à direita da linha amarela) e a matriz. É possível perceber que toda região está recoberta por cimento. Além disso, a região do solo apresenta trincas e alguns poros.

Figura 4.15 - Interface entre resíduo e matriz de solo-cimento com trincas.

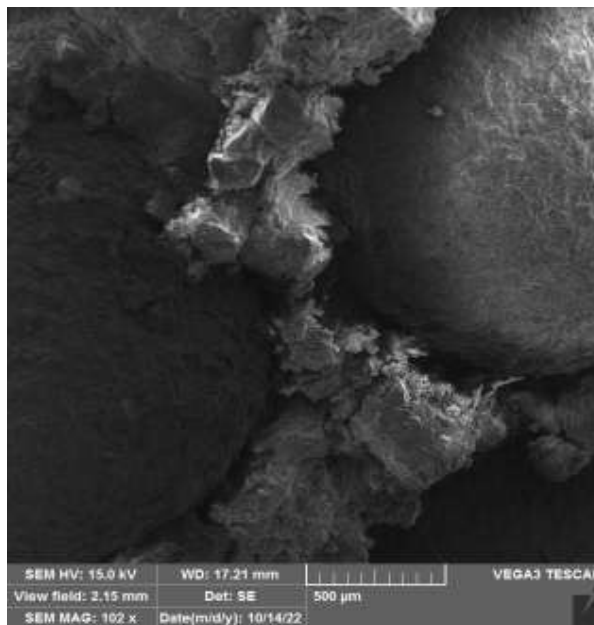


Fonte: Autoria própria.

#### 4.5.4. Corpos de prova com 15% de resíduo

A Figura 4.16 mostra uma região rica em resíduos, com duas partículas adjacentes. Nela é possível ver como a adesão entre as partículas e a matriz foi baixa através da extensão dos vazios ao seu redor.

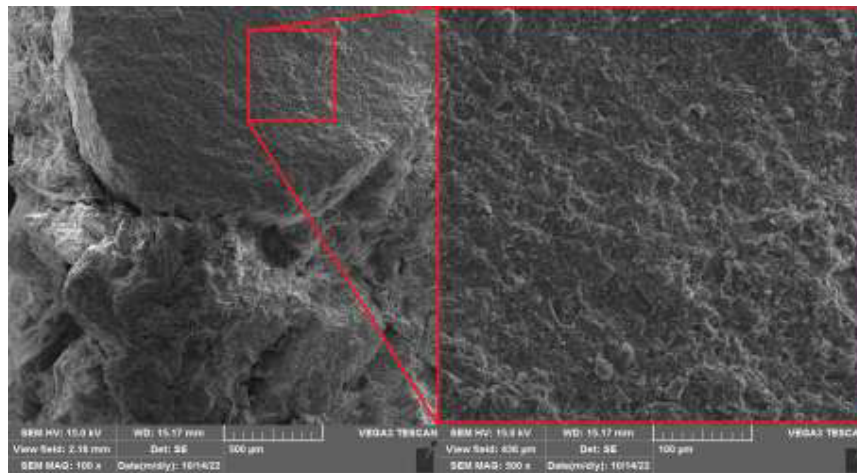
Figura 4.16 - Duas partículas de resíduos incrustados em matriz de solo-cimento.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.17 mostra um local onde a partícula do resíduo de alumínio foi cortada transversalmente. Este corte, no entanto, se deu durante o corte da amostra para a microscopia, e não por efeito do ensaio de compressão. A seção do resíduo mostra como seus poros são muito pequenos, imperceptíveis na imagem. Esta é uma característica de materiais usados como adsorventes. Também nota-se ausência de trincas, indicando que o resíduo de alumínio tem uma alta resistência à compressão - ou que esta é pelo menos superior à da matriz de solo-cimento.

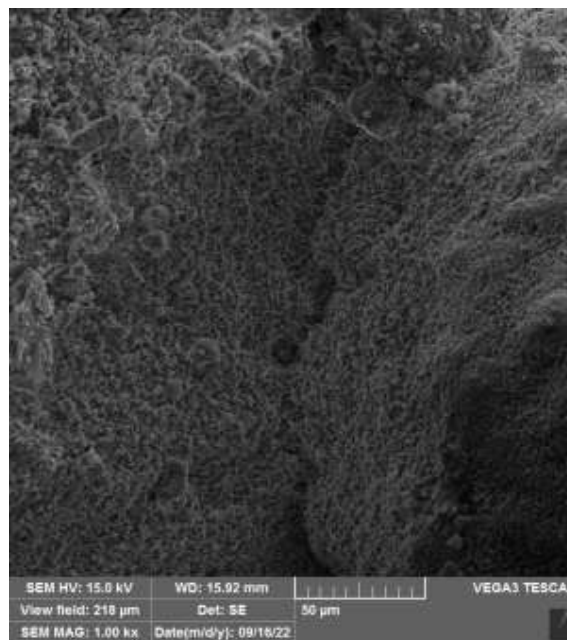
Figura 4.17 - Partícula do resíduo de alumina cortado transversalmente.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.18 mostra uma região onde não há resíduo, mas em que houve um bom recobrimento da matriz com o cimento. Nota-se também uma grande trinca na matriz na região central da imagem.

Figura 4.18 - Região da argila recoberta em cimento.



Fonte: Autoria própria.

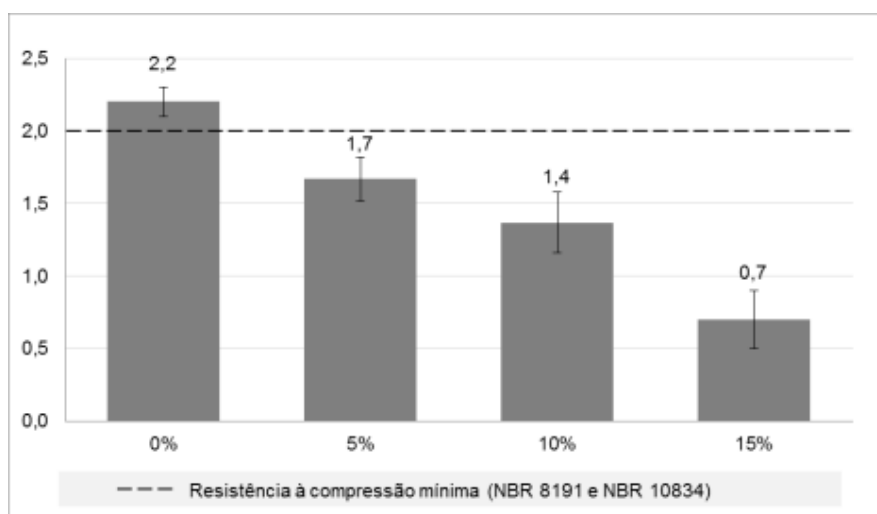
Algumas características puderam ser observadas nas microestruturas, independente da composição, sendo estas características gerais da mistura de solo, cimento e resíduos de alumínio:

- O solo funciona como uma matriz onde os demais elementos se dispersam. Ele apresentou bastante trincas e poros, que são problemáticos para a resistência à compressão e absorção de água em materiais cerâmicos;
- O cimento recobriu algumas regiões, sendo identificado por duas de suas fases: o gel de silicato de cálcio hidratado e o trissulfatoaluminato de cálcio hidratado. Em alguns locais, o cimento recobriu áreas onde havia trincas na matriz argilosa, indicando sua resistência superior;
- O resíduo sempre aparece com ausência de trincas e seus poros são muito pequenos para serem vistos na microscopia eletrônica de varredura. No entanto, sua adesão à matriz de solo-cimento é baixa, com grandes espaços vazios entre eles - apesar de haver algumas áreas com um bom preenchimento das interfaces devido a compactação.

#### 4.6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 4.19 mostra como a resistência à compressão foi afetada com a adição gradual de resíduos de alumina às misturas de solo-cimento. Cada barra do gráfico representa a média dos valores obtidos para a resistência máxima à compressão de três corpos de prova. A linha tracejada a 2 MPa indica o limite mínimo de resistência à compressão que a mistura de solo-cimento deve ter após cura de sete dias para assim atender os requisitos das NBRs 8191 (tijolos) e 10834 (blocos).

Figura 4.19 - Resistência à compressão em função do percentual de resíduo.



Fonte: Autoria própria.

Fica claro através do comparativo que o acréscimo de resíduo reduz a resistência à compressão. Os corpos de prova fabricados sem resíduo ultrapassaram a marca de 2 MPa de resistência à compressão, ficando com uma resistência de 2,2 MPa. Os demais corpos de prova não poderiam ser validados seguindo este critério.

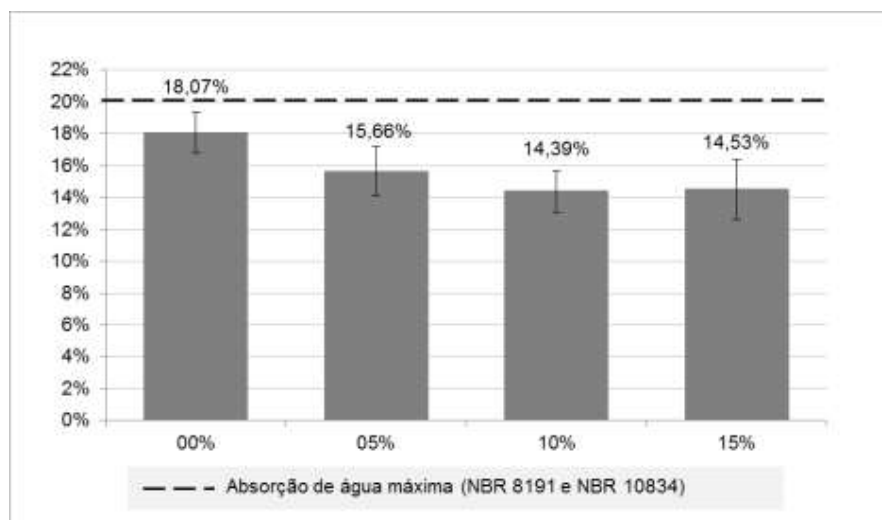
O corpo de prova com resíduo que chegou mais perto da marca de 2 MPa foi o que continha 5% de resíduo, alcançando 1,7 MPa. Este valor é o mínimo que cada corpo de prova individual deve ter quando submetido a um ensaio à compressão. Isso indica que alguns corpos de prova seriam aprovados por este critério. No entanto, é preciso que o lote de corpos de prova atinja uma média de 2 MPa, o que não foi o caso.

Apesar da aparente resistência das partículas de resíduo observadas no MEV e da grande resistência à compressão esperada para a alumina, algum outro mecanismo deve ser capaz de explicar a redução na resistência à compressão dos corpos de prova. Pelo que pode ser observado nas microscopias, este mecanismo é a quantidade e a extensão de vazios que surgem entre as partículas do resíduo e a matriz de solo-cimento. Estes vazios também são indicativos da ausência de reação entre os silicatos de cálcio do clínquer com a alumina do resíduo. Caso houvesse esse tipo de reação, haveria uma ligação muito forte entre as partículas de alumina e o cimento, que também serviria de ligação entre a alumina e o solo, elevando a resistência à compressão dos corpos de prova com o acréscimo de resíduo de alumina.

#### 4.7. TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Figura 4.20 mostra como a absorção de água foi afetada com a adição gradual de resíduos de alumina às misturas de solo-cimento. Cada barra do gráfico representa a média dos valores obtidos para a absorção de água de dois corpos de prova, após submersão por 24h em tanque com água. A linha tracejada a 20% indica o limite máximo de ganho de massa de água que a mistura de solo-cimento deve ter neste período de submersão após passar por sete dias de cura, atendendo assim aos requisitos das NBRs 8191 (tijolos) e 10834 (blocos).

Figura 4.20 - Teor de absorção de água em função do percentual de resíduo.



Fonte: Autoria própria.



Os gráficos mostram que o acréscimo de resíduo reduz o teor de absorção de água dado por percentual de massa. Todos os corpos de prova ficaram abaixo da marca de 20%, indicando que todas as formulações de massa de solo-cimento, independentemente da quantidade de resíduo acrescentado, atenderam aos critérios de absorção de água definidos pelas normas brasileiras.

Era de se esperar que, com o aumento da quantidade de vazios formados ao redor das partículas de resíduos, o teor de absorção de água aumentasse. Porém, o efeito observado pode ser explicado pela baixa capacidade de absorção de água do próprio resíduo, que apresenta poros muito pequenos e ausência de trincas.

Em um determinado momento durante este trabalho, foi tentada a utilização de capeamento por pasta de cimento. Para realizá-la, foi preciso mergulhar a base dos corpos de prova antes da aplicação da camada de cimento. Os corpos tinham sido parcialmente mergulhados na água ao mesmo tempo, mas depois de algumas horas observou-se que quanto maior o percentual de resíduo menos água subiu através do corpo de prova por efeito de capilaridade. Isto é mostrado na Figura 4.21, e também indica que o resíduo reduz a quantidade de água absorvida.

Figura 4.21 - Efeito da capilaridade em corpos de prova com diferentes percentuais de resíduos.



Fonte: Autoria própria.

No Capítulo 5 a seguir serão apresentadas as conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou o efeito da adição de resíduo de alumina proveniente de leito de catalisador em massas para a fabricação de blocos e tijolos de solo-cimento.

O estudo foi feito em duas etapas: na primeira foram analisados dois tipos de solo, um mais argiloso e outro mais arenoso.

Ficou evidente nesta primeira etapa que o solo arenoso não era adequado para a produção de solo cimento devido, inicialmente, ao não atendimento das normas de fabricação de blocos e tijolos em relação à sua granulometria, por não haver material argiloso suficiente neste solo. A falta de material argiloso também ocasionou o não atendimento dos requisitos referentes aos limites de Atterberg, pois a massa produzida pelo solo arenoso não exibiu liquidez nem plasticidade.

Já o solo argiloso atendeu a todos os requisitos necessários para a fabricação de blocos e tijolos de solo-cimento, ficando dentro do exigido em relação à granulometria e aos limites de Atterberg.

Em seguida, foram produzidas quatro formulações de solo-cimento, uma sem adição de resíduo e outras três com acréscimos 5%, 10% e 15% de resíduo de alumina. Com estas formulações foi possível observar o comportamento das massas de solo-cimento formuladas em função da quantidade de resíduo acrescido.

Como os blocos e os tijolos de solo-cimento são validados em função de sua resistência à compressão e teor de absorção de água, estes foram os dois ensaios físicos realizados nos corpos de prova de solo-cimento.

Os ensaios de resistência à compressão mostraram que o acréscimo de resíduo de alumina prejudicou esta propriedade mecânica. Dessa forma, apenas os corpos de prova feitos com solo-cimento puro atenderam ao requisito da norma de resistência à compressão de 2 MPa. De acordo com o que foi observado pelo MEV, esta queda se deve a quantidade e a extensão dos vazios que se formam entre as partículas de resíduo e a matriz de solo-cimento. Esses vazios, por sua vez, indicam uma falta de reação entre a alumina do resíduo e o cimento da matriz.

Já os ensaios de absorção de água indicaram que a presença do resíduo é benéfica para reduzir a quantidade de água absorvida. Apesar dos vazios e das trincas apresentadas nas microscopias, as partículas dos resíduos possuem uma porosidade muito baixa, o que deve ter dificultado a absorção de água do material.

Assim sendo o resíduo de alumina estudado pode colaborar parcialmente na produção de massas de solo-cimento para a fabricação de blocos e tijolos, pois ele colabora na redução de absorção de água do material.

No entanto, algumas modificações podem ser feitas para permitir que as massas acrescidas de resíduos de alumina possam atender a ambos os requisitos estabelecidos nas normas:

- Realizar o estudo com proporções de resíduo abaixo de 5%;
- Fazer um estudo de umidade ótima do solo, para identificar com qual umidade a massa tem maior resistência à compressão;
- Utilizar cimento de classe de resistência maior que o CP II 32 utilizado, optando por outro cimento de classe 40.

## REFERÊNCIAS

AÏTCIN, Pierre-Claude. Portland cement. In: AÏTCIN, Pierre-Claude; FLATT, Robert J (ed.). **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. Cap. 3. p. 27-51.

ANDREOLA, Fernanda *et al.* Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: state of art and glass case studies. **Ceramics International**, [S.L.], v. 42, n. 12, p. 13333-13338, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>.

ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 2. ed. Woburn, Ma: Butterworth-Heinemann, 1999.

ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. Ceramic Materials. In: ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. **Essentials of Materials Science & Engineering**. 2. ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2008. Cap. 15. p. 468-495.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7181:2016**: Solo — Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10833:2012**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2013. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10834:2012**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012 a. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024:2012**: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012 b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025:2012**: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012 c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13555**: Solo-cimento - Determinação da absorção d'água. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1996. 1 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-1:2009**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2009. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:2018**: Cimento Portland — Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457:2016**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459:2016**: Solo — Determinação do limite de liquidez. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180:2016**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181:2016**: Solo — Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491:2012**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012 d. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492:2012**: Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012 e. 4 p.

BEAUDOIN, James; ODLER, Ivan. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. In: HEWLETT, Peter C.; LISKA, Martin (ed.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. Cap. 5. p. 157-250.

BETSUYAKU, Renato Yochio; DELGADO JUNIOR, Horácio Guimarães; VALADÃO, Izabella Christinne Ribeiro Pinto. Produção de tijolo ecológico com resíduo de areia diatomácea. **Cadernos Unifoa**, [S.L.], v. 1, n. 34, p. 23-33, ago. 2017.

CABRERA, Manuel *et al.* Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates with Alumina Waste in Road Construction. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 1466, 17 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14061466>.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. Estruturas e Propriedades das Cerâmicas. In: CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. Cap. 13. p. 510-544.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. **Ceramic Materials: science and engineering**. Berlim: Springer, 2007.

CASTRO, Mário Andrean Macedo *et al.* Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 666-676, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160003.0064>.

ECO MÁQUINAS. **Modelos de blocos e tijolos**. Disponível em:

<https://www.ecomaquinas.com.br/modelos-de-blocos-e-tijolos/>. Acesso em: 01 nov. 2022.

FERREIRA, Regis de C.; CUNHA, Ananda H. N.. Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 8, p. 543-549, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p543-549>.

FLORESTAS. **Como se estudam e classificam os horizontes ou camadas do solo?** Disponível em: <https://florestas.pt/saiba-mais/como-se-estudam-e-classificam-os-horizontes-ou-camadas-do-solo/>. Acesso em: 06 maio 2021.

FRANÇA, Bruno Rangel *et al.* Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. **Materials Research**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 1-6, abr. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-1118>.

GARCIN, Eric *et al.* **Alumina-based adsorbents for the purification of polyolefins**. Titular: Rhône-Poulenc. US n. US-5288849-A. Depósito: 21 dez. 1990. Concessão: 22 fev. 1994.

GIORGI, Priscila *et al.* Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1-13, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0511>.

GOLLMANN, Maria Angélica Cardoso. **Adsorventes para acetona em ciclohexano: aplicações em polimerização de etileno**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

GONÇALVES, José Eduardo *et al.* Caracterización física y mecánica de ladrillos de suelo cemento con la incorporación de diversos residuos. **Informe Gepec**, Toledo, PR, v. 21, n. 2, p. 182-196, jul. 2017.

GONÇALVES, Wherllyson P. *et al.* Microstructural, physical and mechanical behavior of pastes containing clays and alumina waste. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 137, n. [], p. 259-265, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.026>.

GROSS, Jerod; ADASKA, Wayne. **Guide to cement-stabilized subgrade soils**. Ames, Ia: National Concrete Pavement Technology Center, 2020.

GUTIÉRREZ-ORREGO, Diego Alejandro; GARCIA-ARISTIZABAL, Edwin Fabián; GOMEZ-BOTERO, Maryory Astrid. Mechanical and Physical Properties of Soil-Cement Blocks Reinforced with Mineral Wool and Sisal Fiber. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 1-12, mar. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001753](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001753).

HERRERO, Tamara *et al.* Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 123, n. [], p. 404-413, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.014>.

HOSSAIN, Sk S.; ROY, P.K.. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. **Journal Of Asian Ceramic Societies**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 984-1009, 8 set. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

JOSE, Alex; KASTHURBA, A.K.. Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: assessment of its properties and performance. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 273, n. [], p. 121991-121998, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121991>.

KETT, Irving. Brief Overview of Portland Cement and Concrete Technology. In: KETT, Irving. **Engineered concrete: mix design and test methods**. Boca Raton, FL: Crc Press, 2000. p. 11-16.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R.. **Introduction to Ceramics**. 2. ed. Cambridge, MA: John Wiley & Sons, 1976.

KONGKAJUN, Nuntaporn *et al.* Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 1-17, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00448>.

LEONEL, R. F. *et al.* Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. **Cerâmica**, [S.L.], v. 63, n. 367, p. 329-335, set. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672131>.

LÔBO, Josefa Missiliene Cordeiro *et al.* Análise mercadológica do tijolo ecológico solo-cimento na Região Metropolitana do Cariri. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 9, n. 8, p. 1-19, 29 jun. 2020. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.4966>.

LÓPEZ-ALONSO, M. *et al.* Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 195, n. [], p. 249-257, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.084>.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. New York, NY: McGraw Hill, 2013.

MENEZES, R. R. *et al.* Uso de resíduo da produção de alumina eletrofundida na produção de blocos e telhas cerâmicos. **Cerâmica**, [S.L.], v. 56, n. [], p. 244-249, jan. 2010.

MOURA, Elda Marra de *et al.* Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar

em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 69-80, jan. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Solo**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/o-solo.htm>. Acesso em: 03 maio 2021.

NASCIMENTO, Álvaro Morais do *et al.* Tijolo modular de solo-cimento como material na construção civil. **Interscientia**, João Pessoa-PB, v. 6, n. 1, p. 187-202, jun. 2018.

NICOLITE, Micaela. **Aproveitamento de resíduo da produção de alumina eletrofundida em cerâmica vermelha**. 2017. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

PINTO, Eduardo da Silva. **Solo-cimento compactado**: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 2016.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Soil-Cement Laboratory Handbook**. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1992.

RAMACHANDRAN, V. S. *et al.* Introduction to Portland Cement Concrete. In: RAMACHANDRAN, V. S. *et al.* **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**. Norwich, NY: William Andrew, 2002. Cap. 2. p. 35-69.

RINCÓN, Jesús Ma. Vitreous and Ceramic Processing for the Recycling of Industrial Wastes. **Key Engineering Materials**, [S.L.], v. 663, p. 11-22, set. 2015. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.663.11>.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino *et al.* Physical-mechanical assessment for soil-cement blocks including rice husk ash. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 14, n. , p. 1-10, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00548>.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHULZE, Darrell G.. An Introduction to Soil Mineralogy. In: DIXON, Joe B.; SCHULZE, Darrell G. (ed.). **Soil Mineralogy with Environmental Applications**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2002. Cap. 1. p. 1-35.

SILVA, Julierme Siriano da *et al.* Análise das propriedades físicas de tijolo ecológico com incorporação de cinzas de secadores de grãos. **Revista Cereus**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 54-68, jul. 2020. Revista Cereus. <http://dx.doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v12n2p54-68>.

SILVA, Thayane Dias *et al.* Uso de granulado de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de tijolos ecológicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 22,

n. 4, p. 1-12, 2 out. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0239>.

SILVA, Valmir José da *et al.* Porous mullite blocks with compositions containing kaolin and alumina waste. **Ceramics International**, [S.L.], v. 42, n. 14, p. 15471-15478, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.199>.

SIMIONI, Fernanda Cavatti *et al.* Solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduos de construção civil para aplicação em sistema de vedação vertical. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 281-296, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400472>.

SIQUEIRA, F. B. *et al.* Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks. **Cerâmica**, [S.L.], v. 62, n. 363, p. 237-241, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623631969>.

SUA-IAM, Gritsada; MAKUL, Natt. Incorporation of high-volume fly ash waste and high-volume recycled alumina waste in the production of self-consolidating concrete. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 159, p. 194-206, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.075>.

TANG, Zhuo *et al.* Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. **Resources, Conservation & Recycling: X**, [S.L.], v. 6, p. 100036, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>.

TULLIO, Leonardo (org.). **Formação, classificação e cartografia dos solos**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.

UOP. **Purification of olefin and polymer process streams**. Des Plaines, Il: Uop, 2011. 10 p. Disponível em: [http://www.himtermosintez.com/sites/default/files/uop-adsorbents-purification-olefin-polymer-streams-brochure\\_copy.pdf](http://www.himtermosintez.com/sites/default/files/uop-adsorbents-purification-olefin-polymer-streams-brochure_copy.pdf). Acesso em: 10 set. 2022.

VILELA, Alan Pereira *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 262, n. , p. 120883-120893, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

VUKSIC, Milan *et al.* Evaluating recycling potential of waste alumina powder for ceramics production using response surface methodology. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 11, n. [], p. 866-874, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.064>.

WANG, Lan. **Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfate**. 2002. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 2002.



