

**EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE
CASCA DE ARROZ E CAL NAS PROPRIEDADES DE TIJOLOS
ECOLÓGICOS**

Guaratinguetá

2016

FELIPE DA SILVA BARROS

**EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE
CASCA DE ARROZ E CAL NAS PROPRIEDADES DE TIJOLOS
ECOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Conselho de Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Ramírez Gil
Co-orientadora: Maria Luiza Gonçalves Pereira

Guaratinguetá
2016

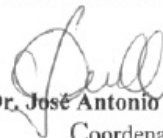
B277e	<p>Barros, Felipe da Silva</p> <p>Efeito da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz e cal nas propriedades de tijolos ecológicos / Felipe da Silva Barros – Guaratinguetá, 2016.</p> <p>76f : il.</p> <p>Bibliografia: f.70-74</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Miguel Ángel Ramirez Gil</p> <p>Coorientadora: Prof^a Dr^a Maria Luiza Gonçalves Pereira</p> <p>1. Tijolos. 2. Pozolanas. 3. Construção civil. I. Título</p> <p>CDU 691.421(043)</p>
-------	---

FELIPE DA SILVA BARROS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

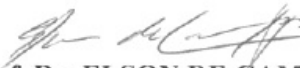


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MIGUEL ÁNGEL RAMIREZ GIL
UNESP/FEG



Prof. Dr. ELSON DE CAMPOS
EEAR



Prof. Dr. FERNANDO VERNILLI JÚNIOR
EEL/USP

DADOS CURRICULARES

FELIPE DA SILVA BARROS

NASCIMENTO	27.02.1990 – PRESIDENTE PRUDENTE / SP
FILIAÇÃO	MARCOS ANTONIO DE BARROS VERA NICE DA SILVA BARROS
GRADUAÇÃO	Engenharia de Materiais - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista
2014/2016	Mestrado em Engenharia de Mecânica – Área de Materiais, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer aos meus pais, por todo apoio, incentivo e confiança que tem me dado durante esse caminho.

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

À minha co-orientadora Dra. Maria Luiza Pereira, por ter aceito o convite em co-orientar, ter transmitido seus conhecimentos, ajudado com o material e se mostrado solícita.

À Liliane Lelis, por vivido e dividido essa etapa comigo.

Ao Prof^o Dr. Sérgio Francisco dos Santos, que foi essencial em todo o meu trabalho, dando contribuições e sugestões muito importantes e compartilhando o seu conhecimento.

Ao Prof^o Dr. Fernando Vernilli Júnior, também com contribuições essenciais, por ter se mostrado solícito e aceito o convite para ser integrante da banca da qualificação e da defesa.

Ao Prof^o Dr. Elson de Campos, por aceitar o convite para banca de defesa e por suas contribuições.

A Domingos Hasmann Neto, técnico do Laboratório de Materiais Cerâmicos da FEG, por ter me ajudado diversas vezes durante a longa parte experimental.

A Luis Felipe Lameze, por ter ajudado no desenvolvimento de todo o trabalho.

À República Arapuca, minha casa, na qual construí importantes amizades.

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

RESUMO

Tijolos queimados de argila são muito usados na construção civil, porém consomem altas quantidades de energia durante o processo de queima. Tijolos de solo-cimento são uma alternativa a esses tijolos, pois dispensam a queima, reduzindo o consumo energético em sua produção. Por outro lado, possuem um problema relacionado com a produção de uma de suas matérias primas, o cimento, que envolve a liberação de alta quantidade de CO₂ durante seu processo de fabricação, um gás amplamente discutido como um dos responsáveis pelo efeito estufa. Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e caracterizar (por meio de ensaios de flexão em três pontos e de absorção de umidade) amostras de solo-cimento com substituições de cimento em teores de 25%, 50%, 75% e 100% por cinza de casca de arroz e cal. Os resultados mostram que quanto maior o teor de substituição de cimento, maior é a perda de resistência mecânica das amostras. Entretanto, a resistência característica aumenta conforme o avanço das idades para uma mesma composição, sendo que aos 28 dias de idade as amostras com substituições de cimento em 0%, 25%, 50%, 75% e 100% obtiveram valores de resistência característica equivalentes a 10,81 MPa, 10,20 MPa, 8,97 MPa, 7,75MPa e 6,29 MPa respectivamente. Em termos absorção de água, apesar de identificado o aumento de seus valores conforme o aumento da substituição de cimento e também com o avanço da idade das amostras, todos os materiais foram aprovados em comparação com os requisitos da norma NBR 8491. Esta norma exige um máximo de 20% de absorção de água, sendo o maior valor encontrado equivalente a 14,52% para a amostra com 100% de substituição e 28 dias de idade. Esses valores indicam a possibilidade de substituição do cimento por cinza de casca de arroz mais cal, sendo a substituição mais adequada a de 75%.

PALAVRAS-CHAVE: Tijolos não queimados. Pozolana. Cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

Burnt clay bricks are widely used in construction industry, but consume high amount of energy during the burning process. Clay-cement bricks are an alternative to these bricks as dispense burning, reducing the energy consumption in its production. However, they have a problem related to the production of one of its raw material, the cement, which involves the release of high amounts of CO₂ during its manufacturing process, a gas responsible for the greenhouse effect. This work had as main study point to develop and characterize (by bending tests and water absorption) clay-cement samples with cement replacements in content of 25%, 50%, 75% and 100% by rice husk ash and lime. The results show that the strength reduces while the cement replacement is increased. On the other hand, the strength increases in function of time for the same composition. Therefore, at 28 days of age the samples with cement substitutions of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% obtained 10.81 MPa 10.20 MPa, 8.97 MPa, 6.29 MPa and 7,75MPa respectively. In terms of water absorption, the amount of absorbed water was higher for the samples with higher age and lower cement content, but all the samples were approved compared to the requirements of ABNT 8491, which requires a maximum 20% of water absorption, being the highest value equivalent to 14.52% for the sample with 100% of cement substitution and 28 days of age. These values indicate the possibility of cement replacement by rice husk ash and lime, being the most appropriate replacement equivalent of 75%.

KEYWORDS: Green bricks, pozzolan, rice rusk ash.

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	10
1.1	INTRODUÇÃO	10
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	OBJETIVOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	ARGILA	14
2.1.1	Cerâmica vermelha e tijolos	16
2.2	CIMENTO	17
2.2.1	Hidratação do cimento Portland	19
2.2.2	Tipos de cimento Portland	21
2.2.3	Tijolos de solo-cimento	21
2.3	MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	23
2.3.1	Arroz e cinza de casca de arroz como pozolana	24
2.3.1.1	Arroz	24
2.3.1.1.1	<i>Produção de arroz em Guaratinguetá</i>	25
2.3.1.2	Cinza de casca de arroz	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	NORMAS	31
3.2	ETAPAS DO TRABALHO.....	32
3.3	MATERIAIS	34
3.3.1	Argila	34
3.3.2	Cinza de casca de arroz	35
3.3.3	Cimento	36
3.3.4	CaO	37
3.4	MÉTODOS	37
3.4.1	Difratometria de raios X	37
3.4.2	Picnometria líquida	38
3.4.3	Distribuição granulométrica da argila	38
3.4.4	Limites de Atterberg	38
3.4.5	Perda ao fogo	39

3.4.6	Fabricação dos CDPs	39
3.4.6.1	Dosagem do cimento	39
3.4.6.2	Cálculo das composições.....	40
3.4.6.3	Mistura dos componentes	42
3.4.6.4	Compactação dos corpos de prova	44
3.4.7	Ensaio de flexão	46
3.4.8	Caracterização dos CDPs de flexão por testes de Arquimedes	48
3.4.9	Teste de absorção de umidade	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	51
4.1.1	Argila	51
4.1.2	Cinza de casca de arroz	52
4.1.3	Cimento	54
4.1.4	Cal	55
4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG DA ARGILA	56
4.3	DENSIDADE DAS MATÉRIAS PRIMAS POR PICNOMETRIA LÍQUIDA	60
4.4	PERDA AO FOGO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	60
4.5	ENSAIOS DE FLEXÃO	61
4.6	ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE UMIDADE.....	64
4.7	CARACTERIZAÇÃO POR ENSAIOS DE ARQUIMEDES	65
5	CONCLUSÕES	67
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – CÁLCULO DAS COMPOSIÇÕES	75

1 APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Tijolos são componentes de construção civil amplamente utilizados. Estima-se que a produção de tijolos esteja em torno de 1,39 trilhões de unidades por ano e que sua demanda continue a crescer. Atualmente há uma grande variedade de tijolos, porém os mais convencionais são os produzidos com argila queimada a altas temperaturas e os tijolos não queimados de solo-cimento (HWANG, 2015).

A argila é, há muito tempo, utilizada em soluções arquitetônicas, por ser um material abundante, de fácil manuseio, fácil obtenção, de baixo custo e apropriado para diversos fins em construções civis (VIRTUTHAGIRI, 2015). Há registro da utilização de argila em diversas culturas, como as antigas culturas egípcia, grega e romana. Também há construções brasileiras seculares que duram até hoje, mostrando a eficiência de materiais derivados da argila, como por exemplo, as construções da histórica cidade de Ouro Preto, em Minas Gerais (MIELI, 2009). Por outro lado, a queima dos tijolos de argila envolve um gasto muito alto de energia e a liberação de poluentes, consequentemente gerando prejuízos ambientais (HWANG, 2015). Tijolos feitos com cimento Portland, ao contrário dos tijolos de argila, possuem a vantagem de não necessitarem do processo de queima para o aumento de resistência mecânica, pois são curados à temperatura ambiente e ganham resistência nesse processo (HWANG, 2015). Entretanto, o processo de fabricação do cimento envolve etapas onde há a liberação de altas quantidades de CO₂, um gás altamente discutido como um dos principais responsáveis pelo efeito estufa (GHANSEL, 2015). De acordo com HWANG, a produção e o uso de cimento Portland emitem uma quantidade de CO₂ equivalente a 7% da quantidade global emitida anualmente (HWANG, 2015).

Tendo em vista o cenário atual, onde há grande preocupação com o meio ambiente, nota-se uma grande necessidade de desenvolver novos produtos e processos que sejam ambientalmente mais amigáveis. Aliado a isso, a busca por novas e mais baratas soluções construtivas e o déficit habitacional no país sustentam essa preocupação (MIELI, 2009).

Um tipo mais recente de tijolo, chamado de tijolo ecológico, ou tijolo não-queimado, mostra-se como uma solução para atender essas necessidades. Esse tijolo é produzido com a adição de alguns materiais alternativos: os provenientes de recursos minerais (como metacaulim) e os provenientes de rejeitos industriais (como a cinza de casca de arroz, serragem, escória de alto forno, entre outros) (HWANG, 2015; BORIES et. al., 2015).

O material utilizado nesse trabalho para a substituição parcial e total de cimento foi a cinza da casca de arroz. Os corpos de prova produzidos sem e com a cinza da casca de arroz foram avaliados física e mecanicamente, de forma a obter dados que possam indicar se a cinza da casca de arroz pode ser usada como substituto parcial ou total do cimento para essa aplicação.

1.2 JUSTIFICATIVA

A cidade de Cunha - SP é conhecida por sua tradição em cerâmica artística e artesanal, possuindo a maior concentração de fornos do tipo noborigama da América do Sul, que são grandes fornos orientais a lenha. A abundância de argila e a concentração de artesãos tornam a atividade muito importante para a cidade. Alguns projetos desenvolvidos pelo Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP-Guaratinguetá têm utilizado a argila dessa cidade para fins artísticos e também de Engenharia.

Dentre os trabalhos realizados pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos da UNESP-Guaratinguetá, pode-se citar a dissertação de RANIERI (2007). A autora caracterizou a argila de Cunha em termos de cor, temperatura de queima, perda ao fogo e resistência mecânica para fins artísticos, levantando informações sobre a importância desse material para a cidade de Cunha e estudando as características de diversas composições da cerâmica da cidade.

O autor Pinto (2011) por sua vez estudou a adição de escória de alto forno a uma mistura de argila e cal para fabricar corpos de prova para ensaios de compressão, com a intenção de verificar se o material seria adequado para fabricação de tijolos não queimados. Os resultados foram promissores, pois o material com teor de 5% de escória obteve o valor de resistência média de 8,19 MPa aos 21 dias de idade, valor muito superior ao que a norma ABNT NBR 8491 exige, que é de 2,0 MPa.

Outro estudo, o de FERREIRA (2015), tratou da comparação do ciclo de vida de tijolos queimados e tijolos não queimados de solo-cimento com o auxílio dos softwares OpenLCA e Eco-indicator 99, que são em suma um banco de dados e softwares para o cálculo de impactos ambientais das matérias-primas e processos utilizados para fabricar um tijolo. O autor constatou que o uso de recursos energéticos é maior para produção de tijolos de cimento do que para produção de tijolos de argila, mas acaba sendo benéfico misturar cimento à argila desde que a quantidade não ultrapasse 40% em peso do tijolo.

O presente estudo utiliza dados e informações obtidas anteriormente, complementando-os e sendo de grande interesse para o desenvolvimento de atividades locais, não só pela utilização da argila da cidade de Cunha, mas também por propor o uso dos rejeitos da cultura de arroz da cidade de Guaratinguetá, que é uma importante atividade econômica desta cidade. Dessa forma pretende-se incentivar o uso de matéria-prima local e a adoção de práticas mais amigáveis e sustentáveis com o meio ambiente, dando um destino mais adequado para a casca de arroz produzida na cidade.

1.3 OBJETIVOS

Principal:

O objetivo principal desse trabalho é fabricar e caracterizar mecânica e fisicamente corpos de prova de solo-cimento, substituindo cimento por teores de cinza da casca de arroz e cal, avaliando-se a viabilidade técnica para futura aplicação no desenvolvimento de tijolos ecológicos de solo-cimento.

Específicos:

– Utilizar e incentivar o uso da matéria-prima local, isto é, os rejeitos da cultura de arroz (casca) da cidade de Guaratinguetá - SP;

– Utilizar rejeitos da cultura de arroz, como forma de minimizar agressões ao meio ambiente;

– Beneficiar e caracterizar as matérias primas usadas na fabricação dos corpos de prova por meio de análises de composição por difratometria de raios X, análise granulométrica, picnometria líquida e análise de perda ao fogo;

–Otimizar cada etapa de processamento (mistura das matérias primas, prensagem, secagem e cura) levando em consideração as características das matérias primas e a geometria dos corpos de prova;

–Caracterizar os corpos de prova do ponto de vista mecânico mediante testes de flexão em três pontos e do ponto de vista físico, no que se refere à densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente.

2 REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 ARGILA¹

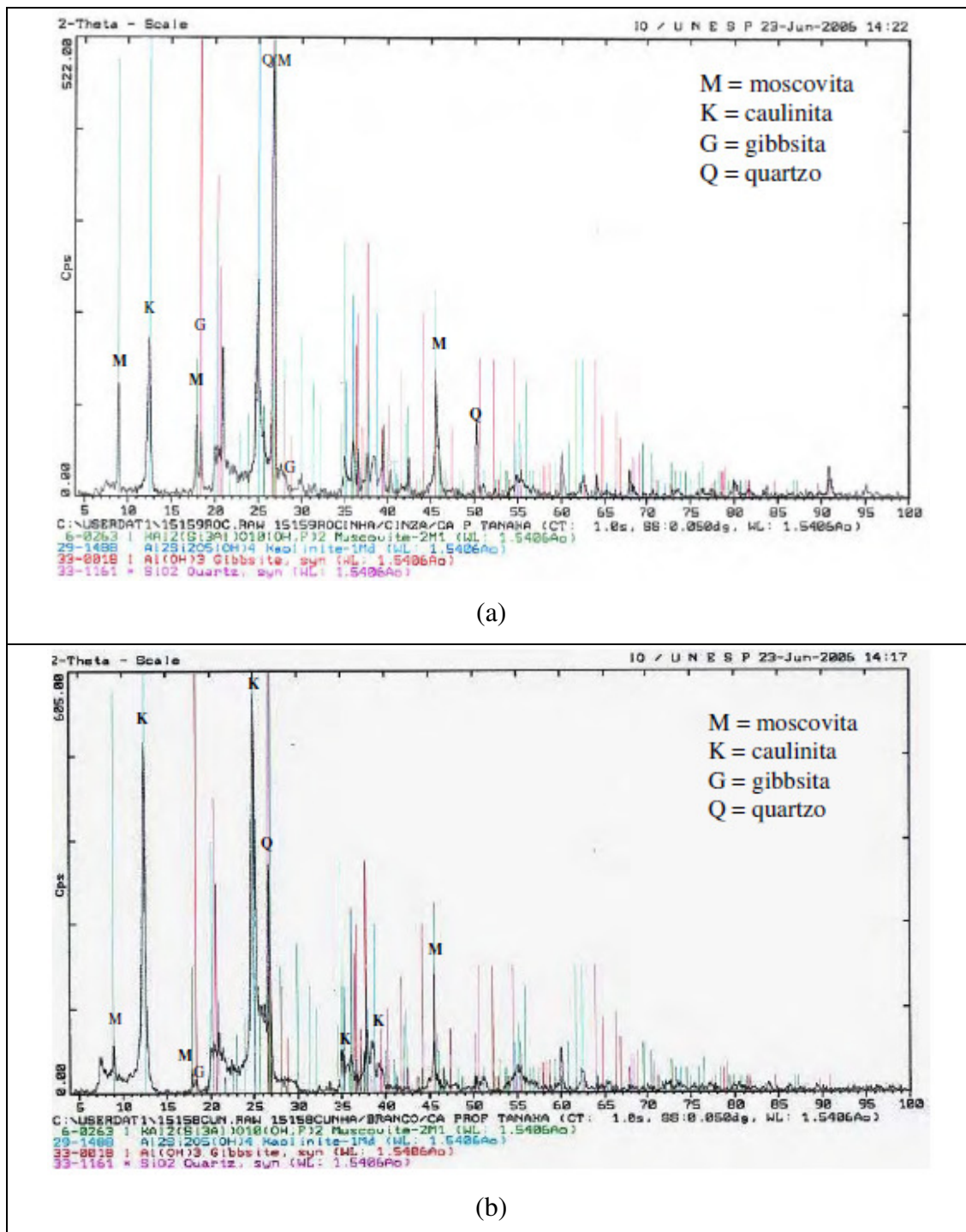
A argila é um material natural, terroso, de granulação fina e que adquire certa plasticidade quando umedecida com água. Quimicamente é formada essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Plasticidade é uma propriedade do material úmido de ser deformado sem se romper pela aplicação de uma tensão, sendo a deformação permanente após a retirada da tensão. Além de plástica quando úmida, a argila tem a característica de ser dura após a secagem e altamente rígida após a sinterização (“queima”) a altas temperaturas (em torno de 1000°C), com valores de dureza comparados a ligas de aço (SANTOS, 1989).

Pode-se chamar de fração-argilosa, um grupo de partículas do solo cujas dimensões se encontram em uma determinada faixa específica de valores, adotada geralmente abaixo de 2,0 µm de diâmetro. Essas partículas são essencialmente cristalinas, pertencente a um grupo restrito de minerais conhecidos como argilominerais. Entretanto, além dos argilominerais a argila pode conter teores de outros materiais e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de minerais residuais como quartzo, mica, calcita, pirita, dolomita e também minerais amorfos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995; SANTOS, 1989). A Figura 1 exemplifica a composição de duas argilas, ambas coletadas em pontos diferentes da cidade de Cunha e estudadas por Ranieri (2007), sendo possível identificar os seus componentes por meio

¹ Faz-se necessário observar que os termos “argila” e “solo” possuem certa semelhança, mas ainda assim, diferenças, o que gera a necessidade de um esclarecimento. A diferença do uso que se dá à nomenclatura desse material está relacionada, principalmente, à área na qual ele é utilizado. O termo “solo” tem maior uso na Engenharia Civil, onde é utilizado para designar, de acordo com a NBR 6502, o “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”. A argila (termo muito utilizado em Engenharia de Materiais) é, de acordo com a mesma norma, o “solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade”. Dessa forma, toda argila é um tipo de solo ou uma fração do mesmo, enquanto nem todo o solo é uma argila. Apesar do material utilizado nesse trabalho ser uma argila, foi decidido por manter o termo “solo” em certas ocasiões, mantendo a nomenclatura utilizada nas normas e nos títulos das mesmas. Por sua vez, quando há referência ao solo utilizado no trabalho, isso é, ao solo argiloso, o termo adotado foi “argila”.

de difratogramas de raios X. Nesse caso há a presença de quartzo e os argilominerais são representados por gibbsita, caulinita e moscovita.

Figura 1: Difratograma das argilas de Cunha estudadas por Ranieri (2007) para as argilas (a) de cor escura e (b) de cor clara.



Fonte: Adaptado de RANIERI, 2007.

Há alguns materiais argilosos que fogem dessas características, como por exemplo argilas do tipo *flint* (*flint clays*), que não apresentam plasticidade quando misturadas com água, apesar de terem outros atributos de argila. Sendo assim, o termo argila não tem um significado genérico, havendo alguns grupos desse material com propriedades específicas (SANTOS, 1989).

Quanto à sua formação, a argila é proveniente da ação do intemperismo hidrotérmico de rochas, que se depositam como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos (SANTOS, 1989).

2.1.1 Cerâmicas vermelhas e tijolos

Entende-se por cerâmica vermelha, ou ainda, cerâmica estrutural, àquela produzida por argilas de tom avermelhado, devido à alta presença de óxido de ferro, que compõem produtos como tijolos, telhas, tubos e manilhas. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, a quantidade de peças de cerâmica vermelha produzida entre 2009 e 2013 foi estimada em 70,8 bilhões de unidades. Considerando que a massa média de um componente é de 2,0 kg, estima-se que a quantidade de argila necessária para a produção dessa quantidade de peças é de 141,6 bilhões de toneladas (Ministério de Minas e Energia, 2015). A Tabela 1 mostra a quantidade estimada de produtos de cerâmica vermelha produzida no período de 2009 a 2013, de acordo com o Ministério de Minas. Nessa tabela, é notável o constante crescimento da quantidade de produtos fabricados, inclusive da quantidade de tijolos.

O consumo de produtos de cerâmica vermelha é tão alto que praticamente se iguala à produção, o que é indício de importância desses materiais para a sociedade contemporânea. Segundo a ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica), o número de empresas brasileiras que trabalham com cerâmica vermelha é de aproximadamente 7400 (Ministério de Minas e Energia, 2015).

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

Tabela 1. Quantidade de produtos de cerâmica vermelha fabricados no período de 2009 a 2013 (em 10^9 peças).

Produtos	2009	2010	2011	2012	2013
Blocos/Tijolos	44,6	49,7	51,5	52,3	53,1
Telhas	14,8	16,6	17,2	17,4	17,7
Total	59,4	66,3	68,7	69,7	70,8

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2015)

2.2 CIMENTO

Cimentos são materiais com grande variedade de composições que tem em comum a propriedade de pega, isto é, a propriedade de endurecimento sem a necessidade de aplicação de calor. Entre os tipos de cimento os mais comuns estão a cal, o cimento Portland e o gesso (NORTON, 1973).

A cal (CaO) é um material obtido pela calcinação de matérias-primas como o calcário (calcita, CaCO_3) e conchas de ostras (aragonita) em fornos estáticos verticais ou fornos rotativos com temperaturas acima de 900°C . Esse óxido é muito reativo, podendo ser hidratado com água para formar cal hidratada, em um processo que envolve considerável liberação de calor. A cal é muito utilizada na composição de argamassas, onde hidratada e misturada com areia, forma uma mistura que endurece lentamente pela absorção de CO_2 do ar (que formará CaCO_3) e pela reação com a sílica (formando silicatos de cálcio) (NORTON, 1973).

O cimento Portland é um tipo de cimento hidráulico, ou seja, um cimento que endurece na presença de água. É um dos materiais estruturais mais importantes da construção moderna, tendo boa resistência à compressão e razoável durabilidade. Sua produção é resultante da moagem de um produto denominado clínquer, o qual é obtido pela calcinação de argilas e calcário em proporções adequadas. Também podem ser utilizadas na produção do cimento escórias de composição química corrigida da indústria siderúrgica. Após a calcinação, é adicionada uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, a fim de regularizar o tempo de início das reações aglomerantes (NORTON, 1973; PAULON, 1987).

Em termos de composição, o cimento Portland é composto basicamente por uma variedade de óxidos, os quais são:

- **CaO:** Componente principal dos cimentos, numa quantidade entre 60% e 67%, provém em maior parte da decomposição do carbonato de cálcio, sendo encontrado em seu estado de liberdade apenas em uma quantidade muito baixa. Sua presença na forma completamente combinada tende a só aumentar a resistência mecânica do cimento;

- **SiO₂:** em uma proporção entre 17% a 25%, se encontra combinado com outros componentes e provém sobretudo das argilas usadas como matéria-prima. Sua combinação com a cal resulta nos compostos mais importantes do cimento, que serão discutimos mais à frente;

- **Al₂O₃:** também proveniente da argila, em uma quantidade entre 3% e 8%, seu composto em combinação com a cal acelera a pega e reduz a resistência aos sulfatos, por isso deve estar presente em pequenas quantidades. Por outro lado não pode ser totalmente eliminado, uma vez que em combinação com a sílica forma um eutético que atua como fundente;

- **Fe₂O₃:** presente entre 0,5% e 6,0% no cimento, proveniente das argilas usadas como matéria-prima para produção do cimento.

- **SO₃:** de origem principal no sulfato de cálcio, atua como regulador de pega em quantidades de até 3% no cimento;

- **MgO:** presente entre 0,1% e 6,5% é proveniente principalmente do carbonato de magnésio presente no calcário;

- **Álcalis (K₂O e Na₂O):** entre 0,5% e 1,3% no cimento, atuam como fundentes.

Como dito anteriormente, os compostos formados pela combinação entre óxidos de silício e óxidos de cálcio são os mais importantes compostos do cimento, formando silicatos de cálcio e que, juntamente com os silicatos de alumínio, são seus compostos majoritários. Esses compostos estão listados na Tabela 2.

Tabela 2: Principais compostos do cimento Portland.

Composto	Fórmula química	Fórmula usual	Proporção (%)
Silicato tricálcico (alita)	(CaO) ₃ SiO ₂	C ₃ S	42% a 60%
Silicato dicálcico (belita)	(CaO) ₂ SiO ₂	C ₂ S	14% a 35%
Aluminato tricálcico	(CaO) ₃ Al ₂ O ₃	C ₃ A	6% a 13%
Ferro-aluminato tetracálcico	(CaO) ₄ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5% a 10%

Fonte: Adaptado de Grande (2013)

2.2.1 Hidratação do cimento Portland

O mecanismo de pega do cimento Portland está relacionado, resumidamente, à dissolução, recristalização, hidratação e precipitação de sílica coloidal na presença de água (Norton, 1973). Especificamente, há duas teorias de endurecimento do cimento Portland, que são a Teoria de Le Chatelier e a Teoria de Michaelis.

De acordo com a teoria de Le Chatelier, o endurecimento é explicado pelo engavetamento de cristais que se formam pela cristalização de uma solução supersaturada de compostos hidratados menos solúveis que os anidros.

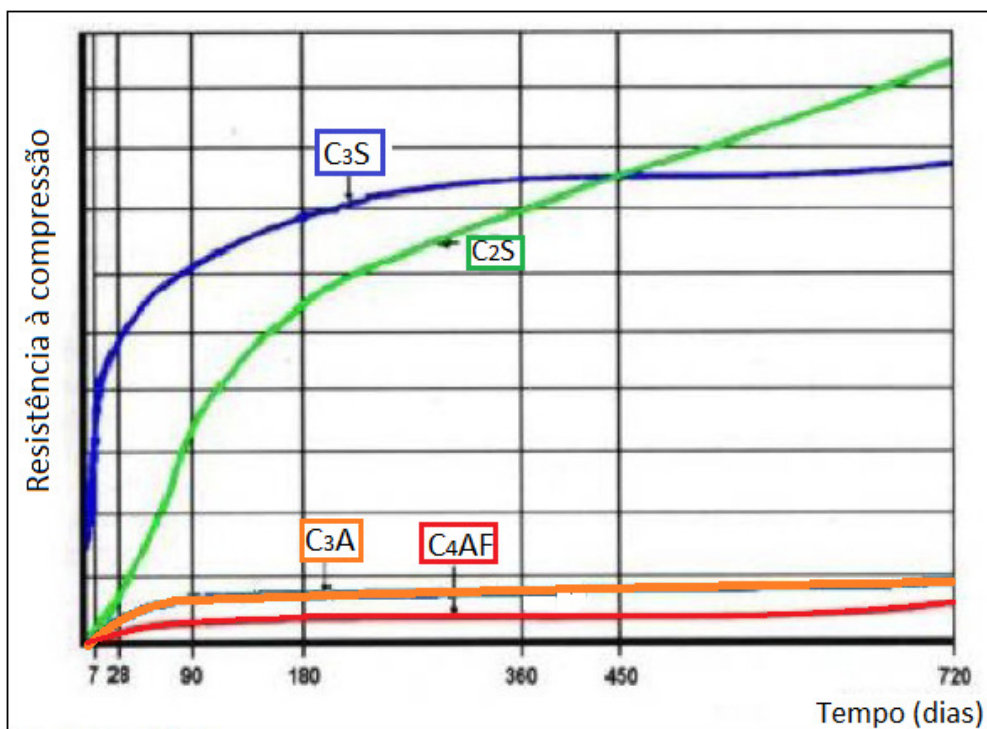
A Teoria Coloidal de Michaelis, por sua vez, enuncia que a hidratação do cimento dá origem a uma solução supersaturada onde se formam agulhas e palhetas hexagonais. Nesse processo ocorre a formação de um silicato monocálcico hidratado, de baixa solubilidade, que dá origem a um gel coloidal na massa geleificada, que aprisiona os cristais. Esse gel continua a tomar água, a massa endurece e impermeabiliza-se.

Seja qual for o modelo mais adequado, o conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como dos diversos fatores como o calor liberado e a velocidade da reação, são de grande importância para o uso prático do cimento Portland. Em síntese, é descrito o comportamento dos componentes do cimento Portland em hidratação (Paulon, 1987; Grande, 2013; Keil 1973):

- C₃S**: responsável pelo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais;
- C₂S**: proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas;
- C₃A**: reage nos primeiros minutos formando aluminatos de cálcio e ocasiona elevado calor de hidratação, propicia pouco desenvolvimento da resistência e forte retração;
- C₄AF**: reage de forma mais lenta que o C₃A e forma aluminato hidratado.

Na Figura 2 está ilustrada a influência que esses quatro compostos exercem na resistência mecânica do cimento em função do tempo, mostrando o que foi exposto acima.

Figura 2: Variação da resistência à compressão dos principais componentes do cimento em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Paulon, 1971.

As reações são muito complexas e ocorrem, praticamente, de forma simultânea, havendo ainda reações entre outros componentes, como o gesso. Entretanto, do ponto de vista de resistência mecânica, as reações mais importantes para o cimento Portland são aquelas que ocorrem com o C₃S e o C₂S. Isso porque a hidratação dos dois componentes irá dar origem aos compostos conhecidos como silicatos de cálcio hidratados, ou C-S-H, que ocupam entre 50% e 60% da pasta de cimento. Esses silicatos podem assumir diversas geometrias e estequiometrias, pois sua formação depende de diversos fatores, como umidade, temperatura e relação CaO/SiO₂. É, porém, de conhecimento, que a reação completa do C₃S e do C₂S com a água dá origem ao C-S-H conhecido como afwillita ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$) mais portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ou hidróxido de cálcio (PAULON, 1987).

2.2.2 Tipos de cimento Portland

No Brasil são produzidos cinco tipos principais de cimento Portland (CP-I, CP-II, CP-III, CP-IV e CP-V), além do cimento branco, que é um tipo especial de cimento produzido com argilas de baixo teor de ferro e manganês, além de modificações específicas no processamento. Os tipos e subtipos de cimento Portland, bem como sua composição, são descritos na Tabela 3, de acordo a Associação Brasileira de Cimento Portland. Esses tipos variam, sobretudo, com a quantidade de adições em sua composição, que são por exemplo a escória de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos. A variedade e o teor dessas adições mudam diversas propriedades no cimento, como tempo de pega, resistência inicial, resistência a sulfatos e devem ser levadas em consideração na hora de escolher o tipo adequado para a finalidade à qual se destina.

Tabela 3: Tipos de cimento Portland, seus subtipos e características.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição em massa (%)				Norma brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comun	CP-I CP-I S	100 99-95	-	-	-	NBR 5732
Composto	CP-II E	94-56	6-34			NBR 11578
	CP-II Z	94-76	-			
	CP-II F	94-90	-			
Alto-forno	CP-III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP-IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP-V	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

2.2.3 Tijolo de solo-cimento

O solo-cimento pode ser definido como um material resultante da compactação da mistura de solo com cimento Portland e água (FERRARI, 2014). Nesse material o solo está presente em maior proporção e o cimento deve ser utilizado na menor quantidade possível de forma a estabilizar o material (SOUZA, 2008).

Segundo Ferreira e Oliveira (2007), “estabilização do solo” é um processo no qual um solo se torna mais resistente à deformação do que o material primitivo, pois ocorre uma alteração na quantidade das três fases que constituem o solo (sólido, água e ar) (FERREIRA,2007; ALBUQUERQUE, 2008). Exemplos de estabilizadores utilizados em solos são o betume, cimento, cal, cinza volante e resinas (FERREIRA,2007).

Segundo Enteiche (1963), citado por Grande (2003), o processo de estabilização de um solo por cimento é de caráter físico-químico. Nele ocorre a basicamente a reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias cimentantes nos contornos intergranulares (GRANDE, 2003). Essas reações envolvem a hidratação de silicatos e aluminatos nos compostos do cimento formando um gel que envolve partículas adjacentes de solo, aumentando a resistência do material (FERRARI, 2014).

As vantagens na utilização de tijolos de solo-cimento são muitas, sendo as principais (GRANDE, 2003, ALBUQUERQUE, 2008):

- Fabricar tijolos de solo-cimento em prensas manuais e no próprio local de obra reduz perdas de material, tem maior disponibilidade de abastecimento, oferecem economia de transporte e menor custo se comparado com o sistema convencional de produção de tijolos queimados;

- Os tijolos de solo-cimento apresentam variações volumétricas desconsideráveis com a absorção e a perda de umidade;

- Quando submerso em água o material não se deteriora e, por ser menos permeável, tem maior durabilidade;

- Por dispensarem a queima são menos agressivos ao meio ambiente em comparação com tijolos queimados de argila;

- Há ganhos em resistência à compressão.

Entretanto, para que seja possível garantir muitas dessas vantagens do tijolo de solo-cimento, é necessário que seja dada atenção a variáveis como o teor de água, o teor de cimento e a massa específica desejada (que não é foco desse trabalho) (ALBUQUERQUE, 2008).

2.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS

De acordo com a norma NBR 12653/1992, pozolanas “são materiais silicosos ou silicoaluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992). O nome pozolana remete às cinzas vulcânicas encontradas próximo ao Monte Pozzuoli, na Itália, e passou a ser mais abrangente com a descoberta de materiais naturais que apresentam propriedades cimentícias. São exemplos de pozolanas a sílica ativa, cinzas volantes e argilas calcinadas, onde se enquadra o metacaulim (MEDINA, 2011).

As pozolanas podem ser naturais ou artificiais. São naturais aquelas que derivam de rochas ou minerais vulcânicos que, depois de passadas por processos de britagem, moagem e classificação, são ativadas termicamente para a retirada de impurezas e depois sofrem um resfriamento abrupto, que lhes conferem um caráter vítreo ou amorfo. As pozolanas artificiais são aquelas provenientes de resíduos e subprodutos de origem industrial, tal como o bagaço da cana e a cinza da casca de arroz (CCA) (MASSAZZA, 1998).

A reação pozolânica caracteriza-se pela reação da fase vítrea da pozolana com hidróxido de cálcio e pode ser assumida da seguinte forma: pozolana + hidróxido de cálcio + água = compostos hidratados. Essa reação da pozolana com o hidróxido de cálcio para formar C-S-H (silicato de cálcio hidratado) é descrita na Equação (1) (MASSAZZA, 1998). O C-S-H não é um composto bem definido, podendo assumir variadas estequiometrias, dependendo de condições como a relação CaO/SiO₂ da mistura, do teor de água, da temperatura e pressão durante a hidratação (MASSAZZA, 1998).



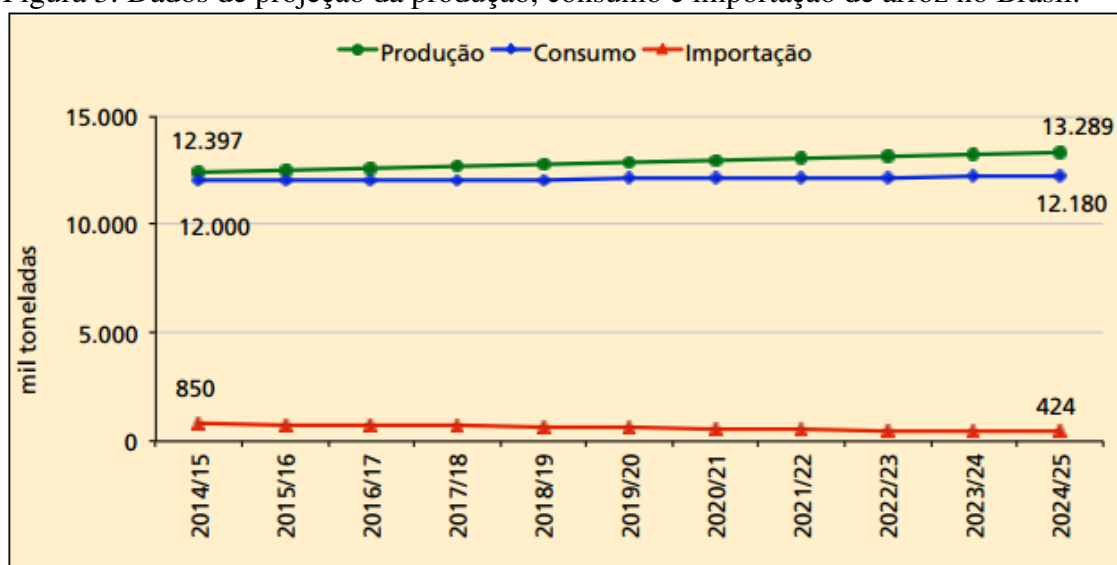
2.3.1 Arroz e cinza de casca de arroz como pozolana

2.3.1.1 Arroz

O arroz é uma planta da família das gramíneas, do gênero *Oryza*, que possui em torno de vinte espécies. Sua origem ainda é incerta, se é da China ou da Índia, mas sabe-se que foi introduzido ao Brasil pela frota de Pedro Álvares Cabral, tendo, porém seu cultivo relatado após o ano de 1530, na capitania de São Vicente. O arroz é um dos cereais mais importantes para a alimentação humana, ficando atrás apenas do trigo (CONAB, 2015).

Segundo dados da CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento), a produção mundial de arroz beneficiado foi em torno de 475 milhões de toneladas na safra de 2014/2015, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 12 milhões de toneladas de arroz em casca, que representa 75% da produção do Mercosul. De acordo com a projeção do Ministério da Cultura, Pecuária e Abastecimento, ilustrada Figura 3, a produção de arroz tende a crescer em 7,2 % entre as safras de 2014/2015 e 2024/2025 no Brasil (Ministério da Cultura, Pecuária e Abastecimento, 2015). Esses números são indicadores da expressividade do arroz como um dos principais cereais produzidos no mundo e, tendo em vista que 20% em massa do arroz produzido é representado pela casca, é possível considerá-la como um dos resíduos mais abundantes da agroindústria e ainda, com projeção de aumento (Revista Pesquisa FAPESP, 2000; CERÂMICA INDUSTRIAL). De acordo com DELLA et. al., o uso da casca de arroz, apesar de seus potenciais, é basicamente na forma de combustível para secar o próprio arroz (devido ao seu alto poder calorífico de 16.720 kJ/kg), sendo o restante descartado em aterros, perdendo-se o seu potencial de uso (DELLA, 2005).

Figura 3: Dados de projeção da produção, consumo e importação de arroz no Brasil.



Fonte: Ministério da Cultura, Pecuária e Abastecimento (2015).

2.3.1.1 Produção de arroz em Guaratinguetá

De acordo com a CONAB, a produção de arroz no Estado de São Paulo tem caráter de subsistência, apesar de o Estado ser o maior mercado consumidor de arroz do Brasil. Por outro lado, a região do Vale do Paraíba, a qual pertence à cidade de Guaratinguetá, é a região mais expressiva do Estado de São Paulo no cultivo de arroz, sendo responsável por 85% de sua produção (CONAB, 2015). De acordo com a Coopavalpa, a Cooperativa dos Produtores de Arroz do Estado de São Paulo, a região possui cerca de 92 produtores de arroz, responsáveis pela produção de 600 mil sacas de arroz no ano de 2015 (O VALE, 2016), Especificamente em Guaratinguetá, foram produzidas 12.960 toneladas de arroz em casca no ano de 2013 (IBGE, 2013).

Esses números são indicativos da disponibilidade do resíduo (casca de arroz) na região, dando a possibilidade de amplo uso em aplicações mais promissoras do que simplesmente descartar ou aterrar.

2.3.1.2 Cinza de casca de arroz

A cinza da casca de arroz possui grande possibilidade de utilização, principalmente para a aplicação em argamassas e em concretos de alto desempenho, pois o material é composto basicamente por sílica (SiO_2), uma das matérias-primas

desses produtos, visto que quando finamente moída e na presença de hidróxido de cálcio e água irá formar compostos cimentantes (HWANG, 2015; BARROS, 2012).

Alguns estudos mostram como a cinza de casca de arroz é um eficiente substituto do cimento. Como exemplo, Wei J. (WEI, 2016) estudou dois tipos de cinza de casca de arroz, que se diferenciavam principalmente pelo teor de amorficidade da sílica, uma com 94,1% e a outra com 90,5%. Ambas foram usadas substituindo parcelas de cimento em compostos com reforço de fibra natural (sisal), os quais foram testados em ciclos de molhagem e secagem e em ensaios mecânicos. As substituições com a cinza de maior teor de amorficidade foram as que tiveram melhores resultados, tanto nos ensaios de flexão quanto nos testes de molhagem e secagem. Comparadas com o material de referência, feito somente de cimento e fibra, as composições com 20% e 30% de sílica provocaram menores quedas de resistência da fibra após ciclos de molhamento, sendo de 8% e 7% respectivamente, contra 35,1% da amostra de cimento. Os resultados mostram que além dos ganhos em resistência mecânica, a adição de cinza ainda protegeu as fibras da degradação, pois diminuiu a alcalinidade do material (WEI, 2016).

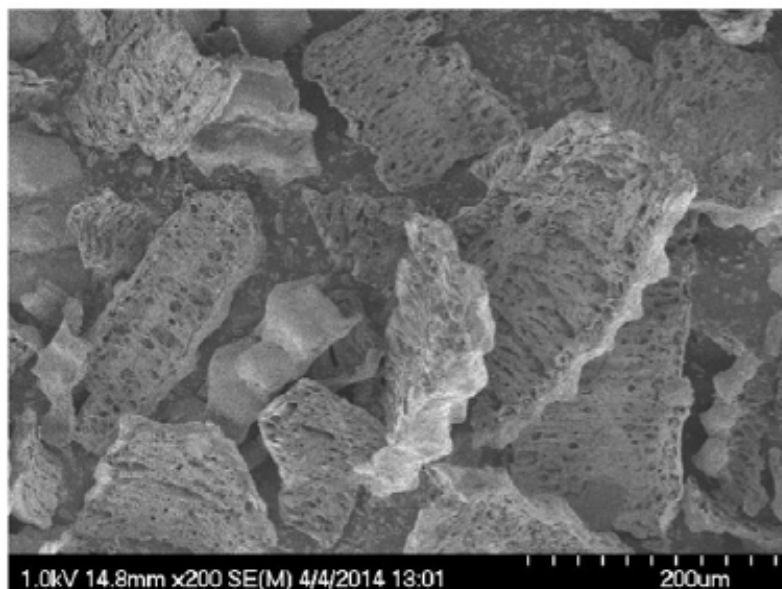
Em outro estudo, o de Kasmi, et. al. (KASMI, 2016), foi utilizada a cinza de casca de arroz cristalina para a fabricação de tijolos de argila queimados. Foram feitas incorporações de 5%, 10% e 15% na argila, formando um material que foi queimado a 800°C por 36 horas. Os resultados mostraram que apesar da queda de resistência mecânica em compressão conforme o aumento do teor de cinza, os tijolos ainda possuíam valores adequados para sua finalidade, estando dentro das normas, sendo o melhor valor equivalente a 6,62 MPa, obtido no tijolo com 5% de cinza. Os autores ainda constataram que a adição de cinza de casca de arroz aumentou a porosidade dos tijolos, fator que aumenta a absorção de água, mas contribui para a redução de peso do componente, além de isolamento térmico. Adicionalmente foi comprovado que a adição de cinza de casca de arroz aumentou a resistência a sulfatos. Por esses motivos, os autores concluíram que o uso de cinza de casca de arroz em tijolos de argila queimados nas proporções estudadas é viável, contribuindo para uma prática sustentável e para a redução de custo dos tijolos (KASMI, 2016).

Esse aumento de porosidade observado por Kasmi, et. al. tem relação com a estrutura da cinza de casca de arroz. De acordo com o que foi observado por Wei (2016), a cinza de casca de arroz tem uma estrutura porosa, como mostrado na Figura 4,

o que pode ter relações com a redução da densidade dos materiais produzidos com ela e também com o aumento porosidade e da absorção de água.

Alguns estudos recentes citam ainda o uso da cinza da casca de arroz para a obtenção de materiais carbonosos, que se apresentam entre 10% a 40% na composição da cinza da casca de arroz produzida em atmosfera redutora, o que mostra a versatilidade para esse produto, como ilustrado na Figura 5 (SHEN, 2014). Entretanto, nesse trabalho, o foco será dado à cinza da casca de arroz produzida em laboratório com atmosfera oxidante, a qual contém SiO_2 quase que em sua totalidade, pois é esse o componente de interesse na fabricação de tijolos não queimados.

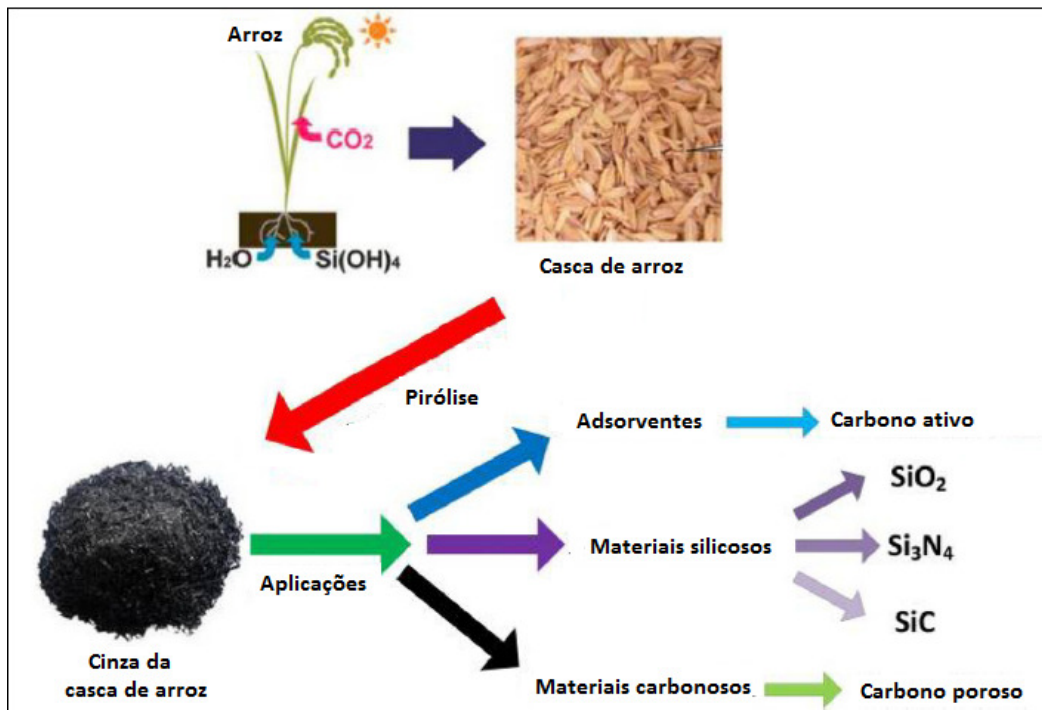
Figura 4: Micrografia da cinza da casca de arroz por MEV com 200 vezes de aproximação.



Fonte: WEI (2016).

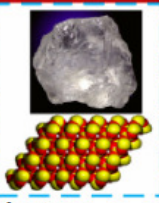
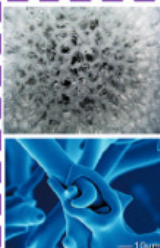
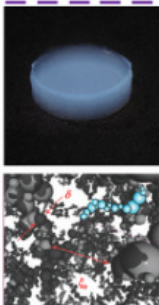
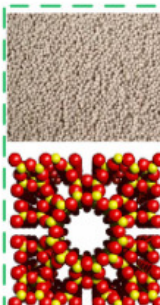
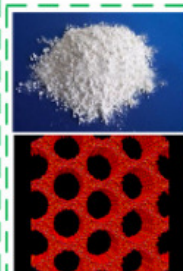
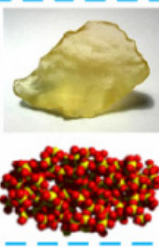
A sílica é um material sólido de fórmula química SiO_2 . A estrutura de quase toda a sílica cristalina polimórfica é formada por um íon de silício ligado a quatro íons de oxigênio, onde cada íon de oxigênio é ligado a dois íons de silício. A alta capacidade de variação entre os ângulos Si-O-Si é a razão pela existência de muitos tipos de materiais silicosos, desde materiais cristalinos até materiais amorfos, como ilustrado na Figura 6 (SHEN, 2014).

Figura 5: Esquematização do ciclo da casca de arroz com algumas aplicações da sua cinza.



Fonte: Adaptado de Shen (2014).

Figura 6: Tipos de sílica e suas aplicações conforme arranjo iônico.

Densa	Porosa	
Periódica	Não-periódica	Periódica
 do tipo quartzo	Amorfa Tamanho de poro irregular Arranjo irregular  Esponjas	Cristalina Tamanho de poro constante Arranjo regular  Aerogéis
Não-periódica	 Zeólitas	 Materiais mesoporosos
 do tipo vidro		

Fonte: Adaptado de Shen (2014).

De acordo com Perry (2003), toda sílica produzida por um organismo é chamada de sílica biogênica ou biossíllica (PERRY, 2003, BUDENBERG, 2013). É de conhecimento entre os pesquisadores que o silício é um elemento importante para o crescimento do arroz, funcionando como um nutriente para esse vegetal. O silício entra no arroz dissolvido na água na forma de ácido silícico, sendo posteriormente polimerizado e precipitado na forma de sílica amorfa (SHEN, 2014). Essa sílica amorfa e hidratada se localiza nas partes superiores da planta, na forma de depósitos de opalina dentro e ao redor das células da planta, conferindo um aumento de resistência mecânica e imunológica para o vegetal (BUDEMBERG, 2013; SHEN, 2014; BARROS, 2012). Também é de conhecimento entre os pesquisadores que a quantidade de sílica amorfa presente na casca de arroz varia em torno de 20% de acordo com a variedade da planta, solo e clima de onde foi plantada (SHEN, 2014).

De acordo com Shen (2014), a sílica amorfa presente em plantas é um biomineral muito intrigante e que gera grande interesse de utilização. Entre suas características mais peculiares, se destacam o fato de que ela:

- É certamente o bioesqueleto mais antigo;
- Tem propriedades mecânicas únicas;
- Possuí área superficial extremamente alta, o que confere ao material boas propriedades em adsorção;

Deshmukh (2011) extraiu sílica amorfa da casca de arroz e analisou várias de suas propriedades físicas, como a cor a qual possui muitos indícios da composição (DESHMUKH, 2011):

-Tom cinza muito escuro/preta: alta quantidade de matéria orgânica (exceto quando a química do solo confere uma tonalidade mais escura). Por esse motivo, quanto mais clara a cinza, menos carbono ela tem. É obtida pela queima em torno de 400°C;

-Tom branco: indica o total amorfismo da sílica, obtida pela queima em torno de 500°C;

-Tom de rosa: contém sílica cristalina (tridimita e cristobalita), obtida pela queima acima de 900°C;

Essas características de acordo com a cor se mostraram importantes para a análise da cinza de casca de arroz utilizada no presente trabalho.

Todas essas informações apresentadas sobre a cinza da casca de arroz mostram como esse material é versátil e promissor para a aplicação em diversas finalidades, por isso esse resíduo não pode ser ignorado.

Após a revisão bibliográfica foi possível obter informações sobre os materiais utilizados no trabalho que sinalizam o seu uso de forma promissora para a fabricação de tijolos. Apesar disso, não foram encontrados na literatura trabalhos específicos sobre os materiais em questão (cinza de casca de arroz obtida dos resíduos da cidade de Guaratinguetá e argila da cidade de Cunha) para a fabricação do material proposto. Tampouco foram encontrados trabalhos realizados com as composições em questão. Sendo assim, o presente trabalho tem não só um caráter ambiental focado em sustentabilidade, mas também um caráter inovador sobre esse tipo de material, dada a baixa quantidade de estudos nesse sentido e a falta de normas específicas sobre materiais sustentáveis para a fabricação de tijolos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 NORMAS

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

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

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

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

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

Essas normas são diretrizes para a fabricação de tijolos de solo-cimento e servem como base para a fabricação de tijolos ecológicos, pois citam, além de processos de fabricação, propriedades adequadas para o emprego de tijolos sem função estrutural. Tais normas são utilizadas como base desse projeto também, excetuando-se o fato de que, como se trata de uma análise preliminar do material proposto, o tijolo não será fabricado em suas dimensões para uso final, mas sim na forma de corpos de prova. Couberam então as adequações necessárias no processo de fabricação dos corpos de prova em relação às normas.

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

ABNT NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial;

ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica;

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

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

ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos;

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

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

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

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

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

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

ABNT NBR 8491: Tijolo maciço de solo - cimento;

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

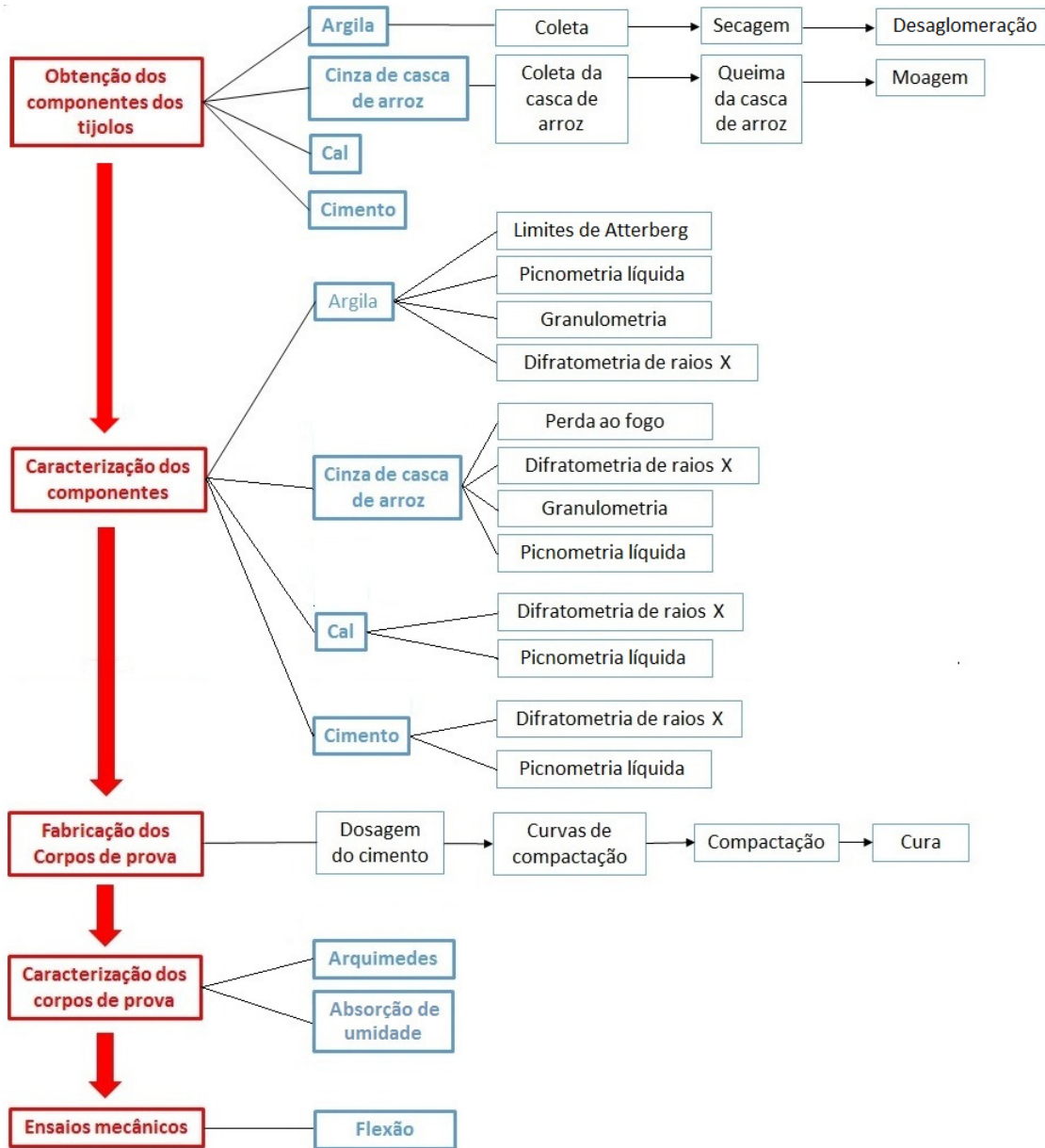
ASTM C20 - 00: *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*;

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

3.2 ETAPAS DO TRABALHO

A Figura 7 ilustra resumidamente as etapas do trabalho realizado.

Figura 7: Esquematização resumida das etapas desenvolvidas no trabalho.



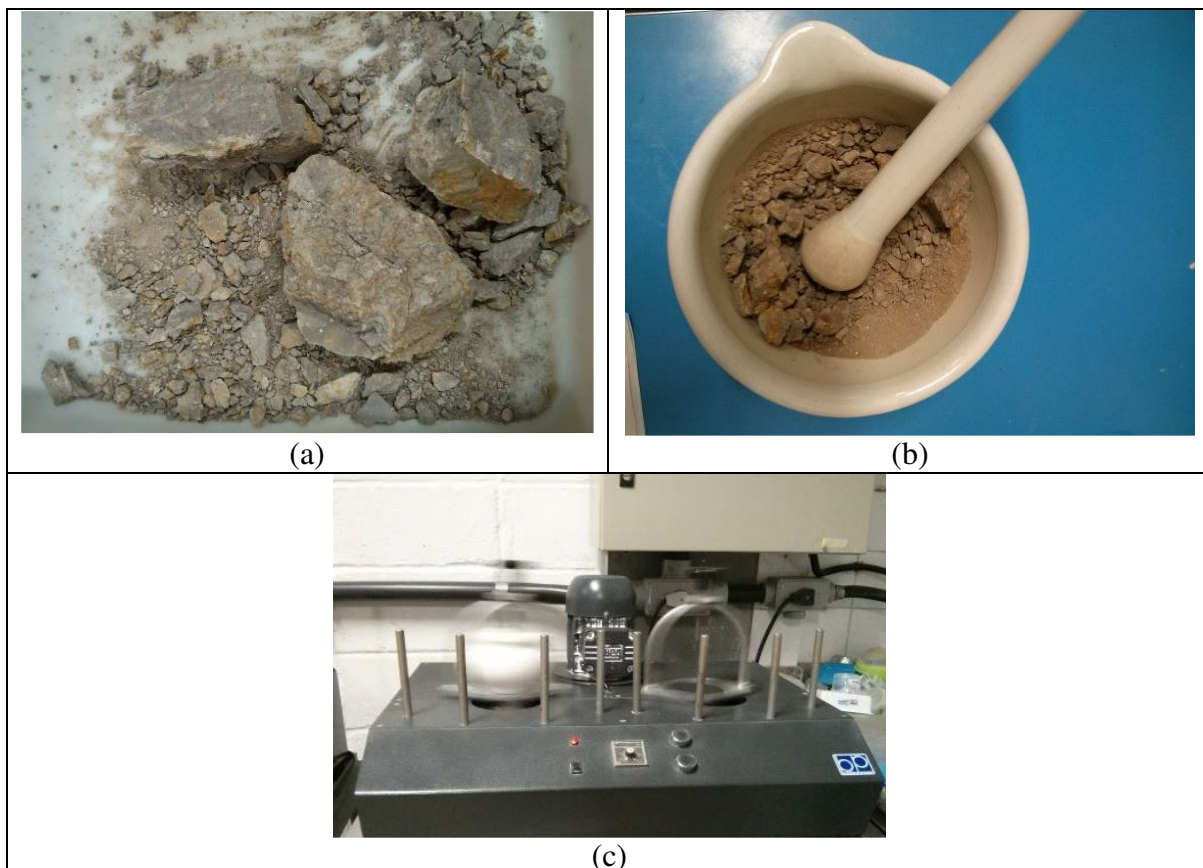
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Argila

A argila foi obtida em pontos específicos conhecidos por ceramistas da cidade de Cunha - SP na forma de grandes porções, como ilustrada na Figura 8(a), buscando uma homogeneidade da amostra e a ausência de impurezas observadas a olho nu, tais como folhas e galhos. Essas amostras foram inicialmente destorroadas manualmente em almofariz, como mostra a Figura 8(b) e depois seguiram para desaglomeração em moinho vibratório, ilustrado na Figura 8(c). O tempo de permanência do material no processo de moagem foi em torno de uma hora. Para a produção dos corpos de prova a argila foi peneirada na peneira de abertura 0,425 mm (ABNT 40).

Figura 8: Sequência de preparação da argila: (a) matéria prima como extraída; (b) desaglomeração em almofariz; (c) moagem em moinho de bolas.

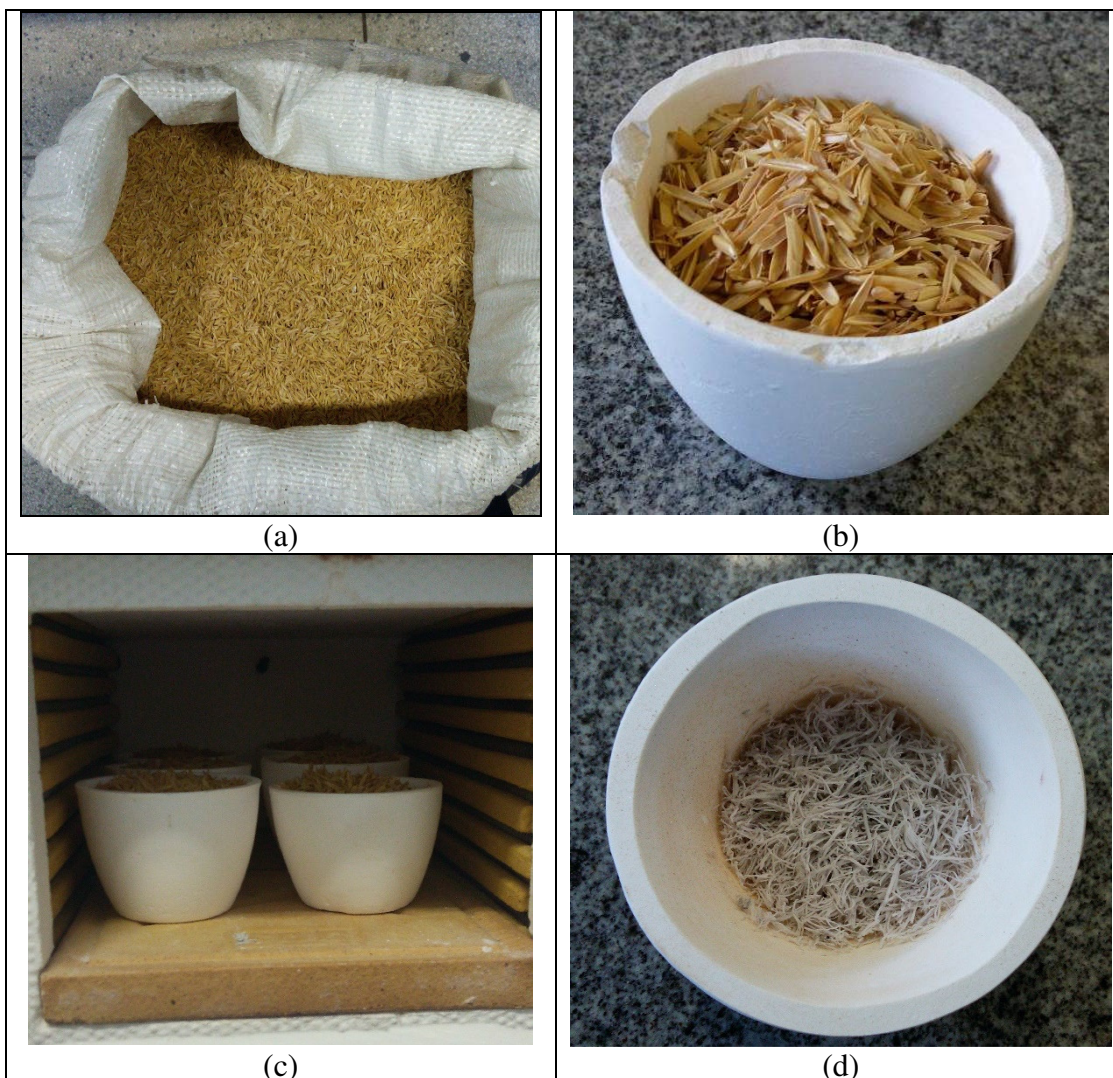


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.2 Cinza de casca de arroz

A casca de arroz foi gentilmente cedida pela COOPAVALPA (Cooperativa dos Produtores de Arroz do Vale do Paraíba). O material fornecido, representado na Figura 9(a), não necessitou de nenhum de processo de limpeza, pois visualmente não apresentava impurezas.

Figura 9: (a) Casca de arroz como recebida; (b) Casca de arroz em cacinhos de alumina para a queima; (c) Cacinhos dispostos no forno para a queima a 600°C por 4 horas; (d) Cinza produzida após a queima.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O tratamento térmico da cinza de casca de arroz foi realizado com o auxílio de cadinhos de alumina, os quais receberam cada um cerca de 5 gramas de casca de arroz (Figura 9(b)) sendo dispostos no interior de um forno do tipo mufla (Figura 9(c)). O aquecimento do forno foi feito desde a temperatura ambiente até 600°C, temperatura indicada por XU et. al. para produção de sílica amorfa (XU, 2015). A taxa de aquecimento foi de 10°C/min e o tempo de permanência à temperatura de 600°C foi de 4 horas. O resfriamento da cinza até a temperatura ambiente, por sua vez, deu-se no interior do próprio forno, com tempo de resfriamento estimado em torno de 11 horas.

Após a obtenção da cinza da casca de arroz (Figura 9(d)) a mesma foi moída em moinho de bolas durante 15 minutos de forma a aumentar a sua reatividade. Feita a moagem, o material foi peneirado na peneira de abertura de 0,075 mm (ASTM 200) para que fosse utilizada na fabricação dos corpos de prova.

3.3.3 Cimento

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

O calcário presente na quantidade de 5% possui uma granulação muito fina, atuando de forma física, aumentando a trabalhabilidade e diminuindo a capilaridade e a permeabilidade (efeito *filler*). Também possui um efeito químico, acelerando a hidratação do C₃S e funcionando como um nucleador para o crescimento de C-S-H (Bosiljkov, 2003; Aqel, 2016; Saca, 2014).

Para a fabricação dos corpos de prova, todo o material foi peneirado na peneira de abertura de 0,075 mm (ASTM 200).

3.3.4 CaO

A cal escolhida nesse trabalho foi a do tipo popularmente conhecida como “cal virgem”, isto é, composta em teoria por óxido de cálcio puro. O material foi comprado em loja idônea de materiais de construção. Para a fabricação dos corpos de prova, todo o material foi peneirado na peneira de abertura de 0,075 mm (ASTM 200).

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Difractometria de raios X

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

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

A técnica de difratometria de raios X foi importante para caracterizar as matérias primas, indicando se elas eram ou não compostas por aquilo que se esperava de acordo com o apresentado na literatura e, conseqüentemente, se poderiam ser utilizadas neste trabalho. Além disso, algumas das matérias-primas foram compradas e foi necessário conferir se atendiam qualitativamente as especificações de composição.

3.4.2 Picnometria líquida

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

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

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

3.4.3 Distribuição granulométrica da argila

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

3.4.4 Limites de Atterberg

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

aqui segue as recomendações da norma ABNT NBR 10833 para solos para aplicação em tijolos.

3.4.5 Perda ao fogo

A análise de perda ao fogo, realizada com base na norma ASTM C114, foi feita utilizando-se de 4,004 g de cinza de casca de arroz, disposta em cadinho de alumina e calcinada à 950°C por uma hora, tempo suficiente para que sua massa deixasse de sofrer variações. Essa análise foi importante para avaliar a eficiência do processo de queima da casca de arroz.

3.4.6 Fabricação dos CDPs

3.4.6.1 Dosagem do cimento

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

- A ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (1988), recomenda para a fabricação de tijolos ecológicos que sejam moldados corpos de prova para análise da resistência à compressão com traços de 1:10, 1:12 e 1:14 de “cimento:solo” e recomenda que seja escolhido o traço que utiliza a menor quantidade de cimento desde que sejam atendidos os requisitos de resistência à compressão da norma NBR 8491 (Associação Brasileira de Cimento Portland, 1988).

- Abiko (1985), citado por Miele (2009), concluiu em seu estudo que solos arenosos podem ser estabilizados com traços de 1:10, 1:12 e 1:14 de cimento e que solos argilosos podem ser estabilizados com 5% a 10% de cal (MIELE, 2009).

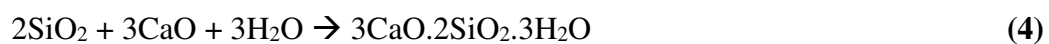
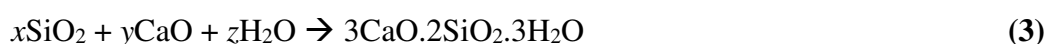
- A norma ABNT NBR 12253 cita que para solos argilosos do tipo A4 a quantidade de cimento para estabilizá-lo vai de 8% a 12% em massa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

Dentre as recomendações apresentadas, optou-se pela norma ABNT NBR 12253, pois o solo utilizado nesse trabalho é do tipo argiloso, que necessita de maiores teores de cimento para ser estabilizado se comparado aos solos arenosos. Além disso, mesmo sendo classificado como solo argiloso do tipo A6, que não é contemplado por essa norma, sendo mais fino que o argiloso do tipo A4, houve aqui a intenção de avaliar se esse solo pode ser utilizado para a fabricação de tijolos de solo-cimento, mesmo que a norma não o contemple. Sendo assim, foi escolhido o teor de 13% de cimento em massa (equivalente a 11% em volume).

É importante ressaltar que apesar de ser um teor levemente superior ao máximo recomendado pela norma, trabalhar com uma ampla faixa de teor de cimento e suas variações permite rastrear o comportamento das composições com o decréscimo de quantidade de cimento, o que está de acordo com o objetivo desse trabalho.

3.4.6.2 Cálculo das composições

A partir da composição de referência, isto é, com 11% de cimento + 89% de argila em volume, parcelas de cimento foram sendo substituídas por uma mistura de cinza mais cal em 25%, 50%, 75% e 100%. Como o sistema “cimento + argila + cal + cinza + água” é complexo, pois há silicatos e óxido de cálcio no cimento e na argila, além da sílica da cinza e óxido de cálcio da cal, é difícil prever as reações que irão ocorrer e os tipos de C-S-H que serão formados. Por esse motivo, a proporção de CaO/SiO₂ foi calculada fazendo algumas considerações. Primeiro, isola-se o sistema “cinza + cal + água” e supõe-se que toda a cal da suspensão reagirá exclusivamente com a sílica da cinza e a água. Segundo, supõe-se que a cinza seja composta exclusivamente por sílica e por fim, adota-se que o tipo de C-S-H que se forma segue a estequiometria da afwillita (3CaO.SiO₂.3H₂O), visto que essa é a estrutura mais comum do C-S-H formado na hidratação da alita e belita do cimento Portland. A partir desse raciocínio, desenvolvido na Equação (3), chega-se à reação entre a cinza, a cal e a água descrita pela Equação (4), e a relação molar CaO/SiO₂ é igual a 1,5, pois:



Sendo assim, a relação CaO/ SiO₂ é equivalente à 3/2, logo 1,5CaO = 1SiO₂.

A Tabela 4 indica as proporções de cada material em cada composição utilizada. Os cálculos realizados para cada composição estão descritos no Apêndice A.

A Tabela 4: Composição dos corpos de prova em teor volumétrico.

Nome da composição	Argila (%)	Cimento (%)	Cinza (%)	Cal (%)
CC0,0 (Cinza mais cal = 0,0%)	89,0	11,0	0,00	0,00
CC2,75 (Cinza mais cal = 2,75%)	89,0	8,25	1,46	1,29
CC5,5 (Cinza mais cal = 5,5%)	89,0	5,50	2,92	2,59
CC8,25 (Cinza mais cal 8,25%)	89,0	2,75	4,37	3,88
CC11,0 (Cinza mais cal = 11,0%)	89,0	0,00	5,83	5,17

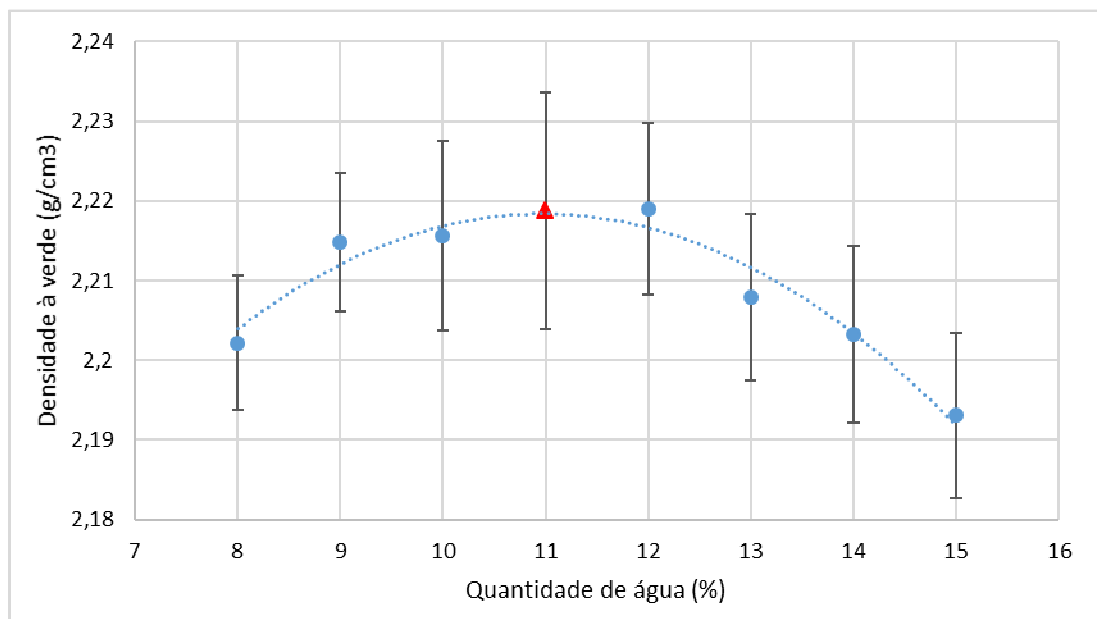
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

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

Apesar da quantidade ótima de água para a compactação variar de acordo com a composição, pretende-se aqui comparar as composições em termos de resistência mecânica, por isso foi decidido diminuir a quantidade de variáveis do processo adotando a quantidade ótima de água do CC0,0 para as demais composições, visto que este é o material de referência.

A curva foi levantada com três corpos de prova por ponto, utilizando-se de uma carga arbitrária de 20 kN (equivalente à 95,9 MPa de tensão) para a compactação. De acordo com a Figura 10, a quantidade ideal de água para compactação é de 11% em massa, indicada pelo ponto vermelho no gráfico.

Figura 10: Curva de compactação da densidade a verde em função da quantidade de água (%).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4.6.3 Mistura dos componentes

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

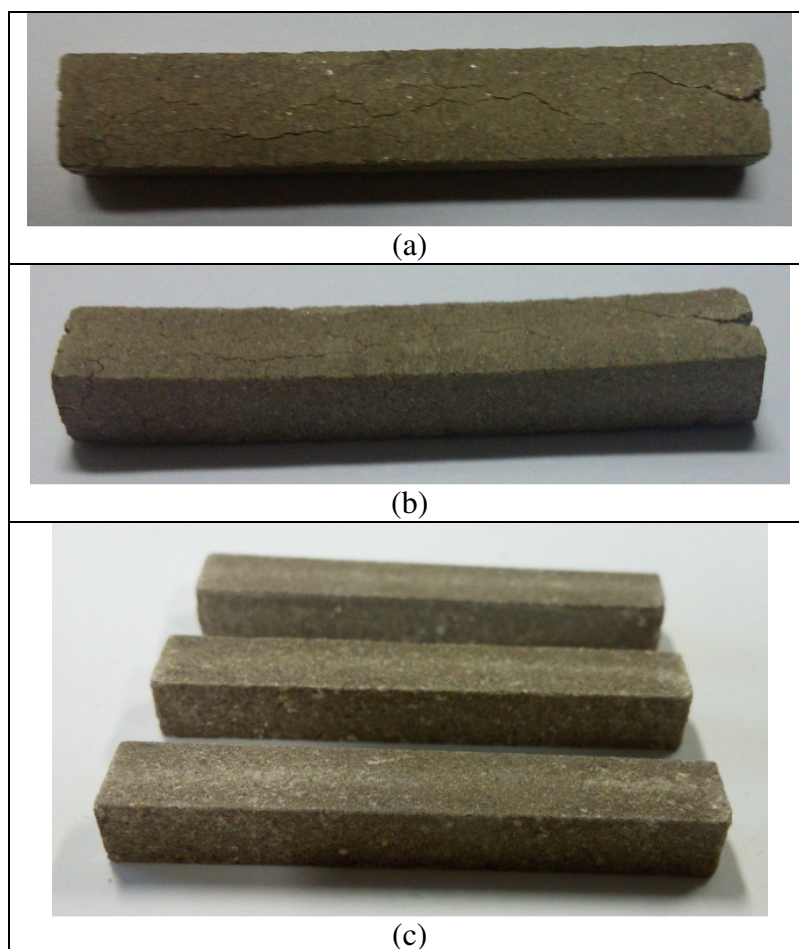
- **CC0,0:** A argila, previamente seca em estufa à 110°C por uma hora e resfriada até a temperatura ambiente foi misturada ao cimento, adicionando-se água.

- **CC2,75, CC5,5 e CC8,25:** primeiro a cal e a cinza de casca de arroz foram misturadas, adicionando-se água e deixando a mistura em repouso por 45 minutos, tempo no qual as reações entre os componentes pôde acontecer para formar o C-S-H teórico (afwilita). Após essa etapa, a argila, previamente seca em estufa a 110°C por uma hora e resfriada até a temperatura ambiente, foi misturada ao cimento e, por fim, essa mistura de cimento e argila foi adicionada à suspensão de cal, cinza e água.

- **CC11:** a cal e a cinza de casca de arroz foram misturadas, adicionando-se água e deixando a mistura em repouso por 45 minutos. Após essa etapa, a argila, previamente seca em estufa a 110°C por uma hora e resfriada até a temperatura ambiente foi misturada à suspensão de cal, cinza e água.

A etapa de mistura prévia de cinza, cal e água para os materiais CC2,75, CC5,5, CC8,25 e CC11 se mostrou importante no processo não só para que fosse disponibilizado tempo para que houvesse, em teoria, reação entre esses componentes, mas também porque sem essa etapa os corpos de prova da composição CC8,25 e CC11 sofreram trincas e empenamento, como ilustrado nas Figuras 11(a) e 11(b). Esse efeito se dá, possivelmente, pelo fato de que a argila é muito hidrofílica, absorvendo a água disponível para a cal e cinza e gerando defeitos no processo de secagem. O tempo de 45 minutos de espera para que a reação entre os componentes ocorresse foi determinado por várias tentativas. A Figura 11(c) ilustra corpos de prova produzidos por meio desse método, sendo possível notar que não houve mais trincas nem empenamentos.

Figura 11: (a) vista superior de um corpo de prova CC10 com trincas e empenamento; (b) vista frontal de um corpo de prova CC10 com trincas e empenamento e (c) corpos de prova sem defeitos após correção no processamento.

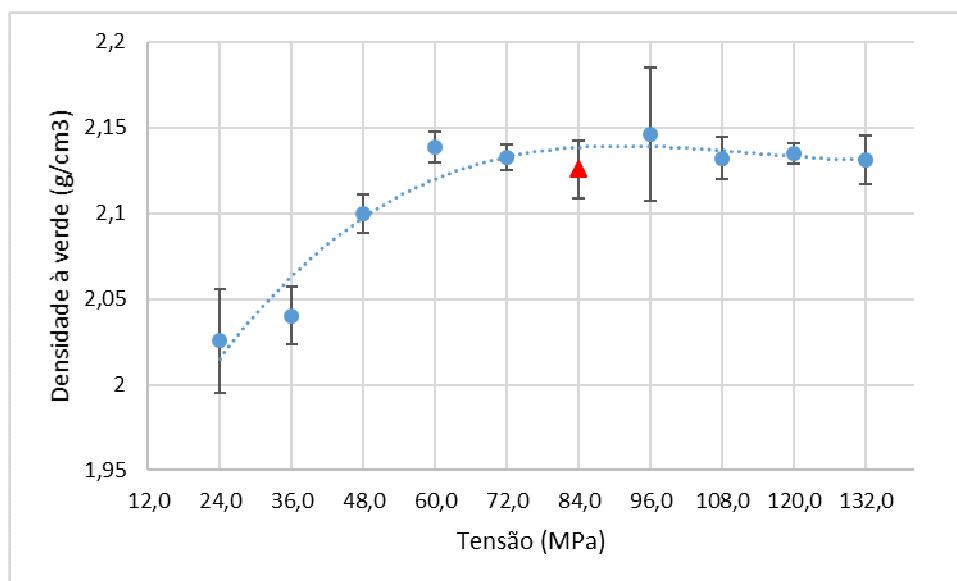


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4.6.4 Compactação dos corpos de prova

A carga utilizada para compactar os corpos de prova também foi determinada por meio de curvas de compactação. Foram feitos três corpos de prova para cada ponto da curva, adotando a quantidade de água em 11% para cada um. A carga ideal para compactar os corpos de prova é a menor carga na qual a densidade à verde máxima é atingida. De acordo com a curva levantada, ilustrada na Figura 12, a tensão ideal para a compactação equivale a 83,9 MPa, indicado pelo ponto vermelho (o que equivale a uma aplicação de 17,5 kN), levando em conta as dimensões do molde, de 5,1mm x 40,1mm em sua área perpendicular à aplicação da carga. Essa carga foi adotada para as demais composições também, a fim de padronizar e diminuir as variáveis do processamento.

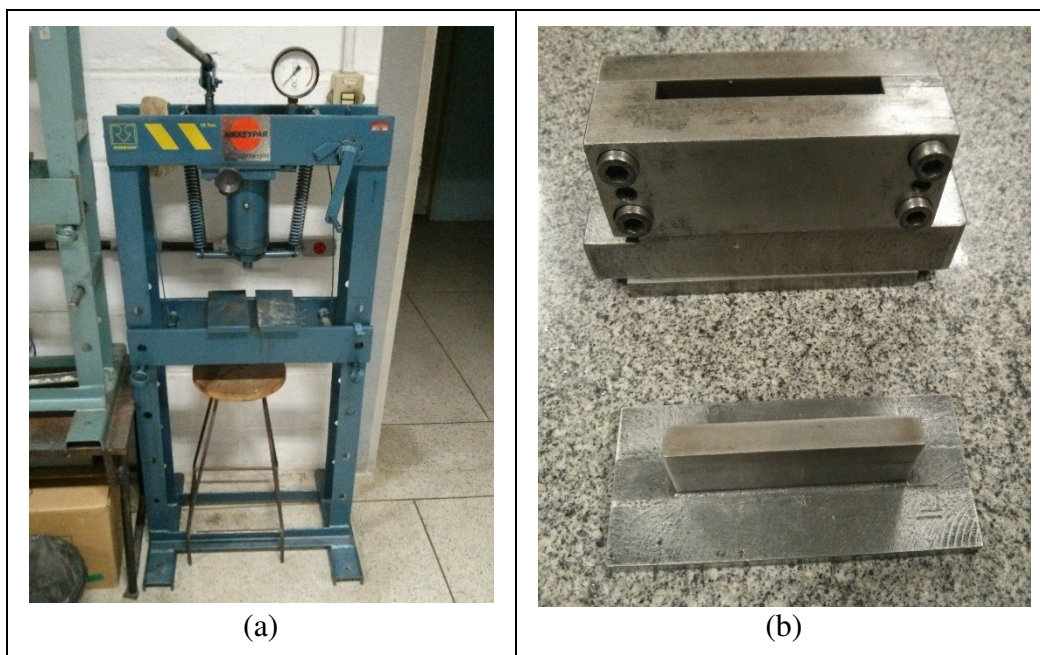
Figura 12: Curva de compactação da densidade a verde em função da tensão de compactação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A compactação dos corpos de prova foi feita em uma presa hidráulica, como ilustrada na Figura 13(a). O molde utilizado foi de aço temperado com as dimensões de 51mm x 40,1mm e altura variável. Esse molde, ilustrado na Figura 13(b), gera uma prensagem de efeito simples (NORTON, 1973).

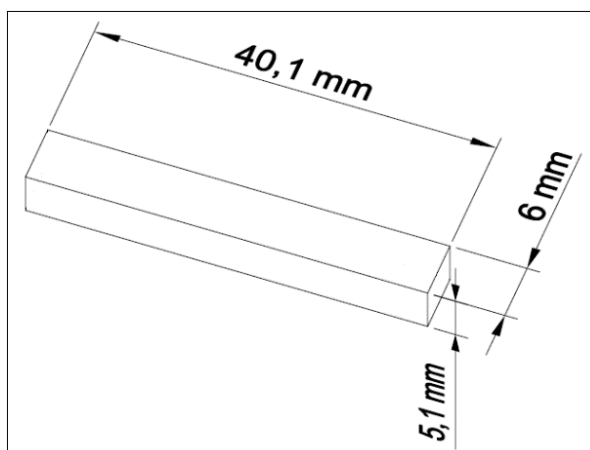
Figura 13: Equipamentos utilizados para produzir os corpos de prova: (a) Prensa hidráulica e (b) molde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fabricar os corpos de prova, uma quantidade da mistura CC0,0 foi colocada no molde, até que sua cavidade fosse totalmente preenchida. Após a prensagem de três corpos de prova nas condições ideais definidas, foram medidas as suas dimensões, que são apresentadas na Figura 14. Os demais corpos de prova foram produzidos respeitando-se essas dimensões, com a intenção de padronizar os corpos de prova.

Figura 14: Dimensões dos corpos de prova produzidos nesse trabalho.

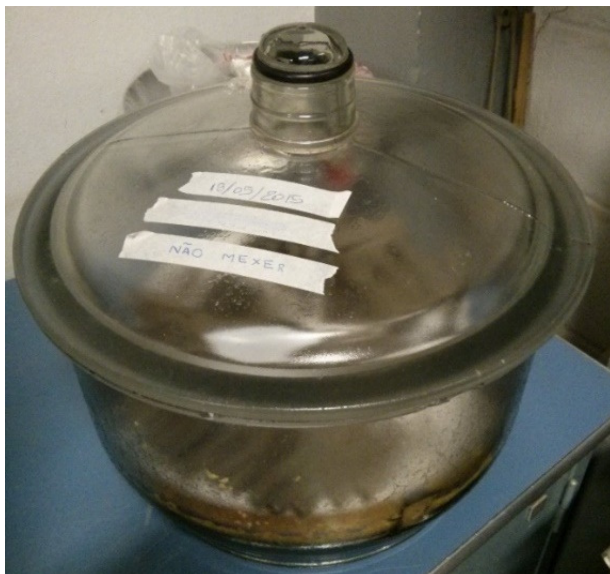


Fonte: Elaborado pelo autor.

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

A etapa seguinte consistiu em armazenar os corpos de prova em uma câmara, a qual é ilustrada na Figura 15, até que atingissem a idade adequada para serem ensaiados, isto é, 7 dias, 14 dias e 28 dias. De acordo com a NBR 12024:2012, a umidade da câmara deve ser mantida em 95%. Nesse trabalho foi utilizada uma câmara artesanal com serragem molhada em um compartimento da base para manter a umidade, a qual foi monitorada com higrômetro e registrada uma média de umidade de 85%, valor considerado adequado.

Figura 15: Câmara utilizada para armazenamento dos corpos de prova.

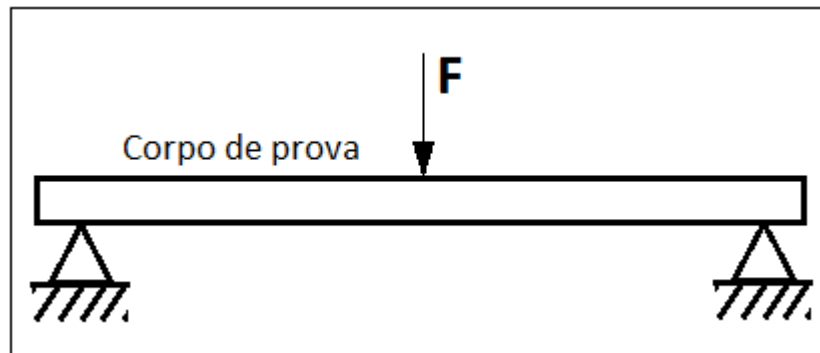


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.7 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP. O tipo de ensaio foi o de flexão por três pontos, como ilustrado na Figura 16. Para tanto, foram selecionados 30 corpos de prova de cada composição para todas as idades. A preparação dos corpos de prova foi feita lixando-se suas arestas em lixa de 600 mesh, de tal forma que as rebarbas presentes pudessem ser eliminadas e sem comprometer o formato dos corpos de prova.

Figura 16: Esquemática do ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O equipamento utilizado foi o Shimadzu Autograph AG – X, com os seguintes parâmetros:

- Célula de carga de 5 kN;
- Velocidade da deslocamento do pistão de 0,5 mm/min;
- Distância entre os apoios do corpo de prova igual a 21 mm.

A tensão de ruptura (σ), isto é, tensão com a qual o material se rompe, é dada pela Equação (5), onde F é a força de ruptura, L é a distância entre os apoios do corpo de prova e b e h são, respectivamente, a largura e a altura do corpo de prova.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (5)$$

A partir desses valores, foi feita a análise estatística de Weibull, que calcula a probabilidade de falha de um corpo de prova de acordo com a Equação (6), onde σ_0 é a resistência característica do material, sendo análoga a média para uma distribuição gaussiana e m é módulo de Weibull, que representa a dispersão de resultados, sendo análogo ao desvio padrão na distribuição gaussiana (WEIBULL, 1951).

$$P = 1 - \exp \left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \right] \quad (6)$$

Com base nessa equação e por meio da regressão linear, obtém-se a Equação (7), sendo P_i o estimador de probabilidade, calculado com base na Equação (8), onde N é o número de corpos de prova e i o número do corpo de prova de 1 a 30 em ordem crescente de σ :

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - P_i} \right) \right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (7)$$

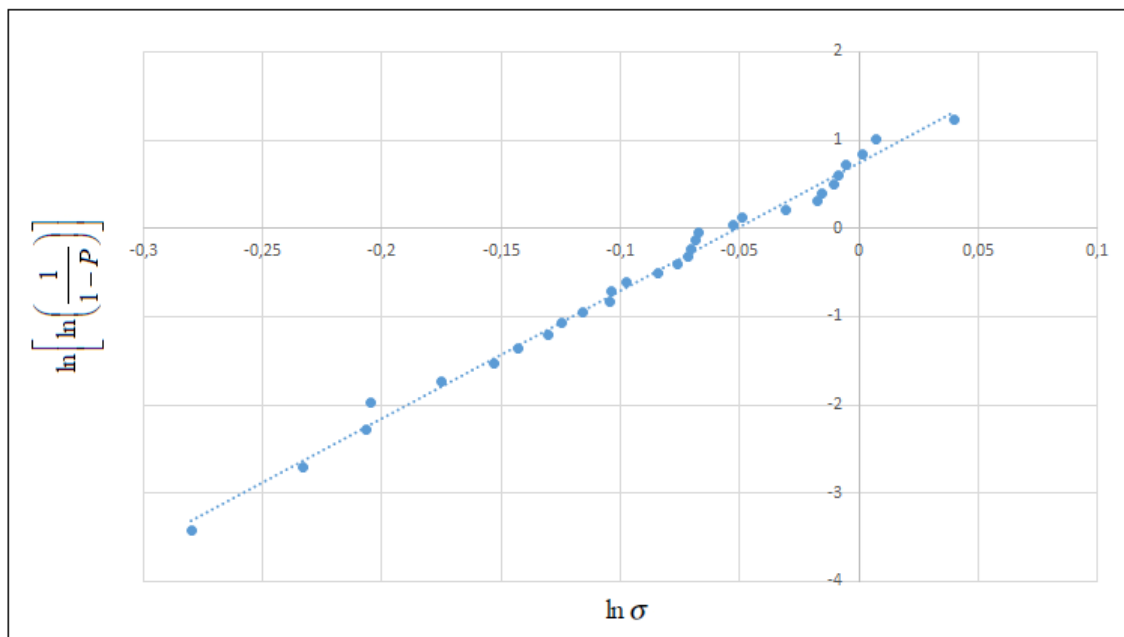
$$P_i = \frac{i}{N+1} \quad (8)$$

A Figura 17 ilustra um gráfico arbitrário de $\ln[\ln(\frac{1}{1-P})]$ em relação a $m \ln \sigma - m \ln \sigma_0$. Com base no gráfico, foram calculados os parâmetros de interesse nesse trabalho. O módulo de Weibull foi determinado como equivalente ao coeficiente angular da reta e a resistência característica (σ_0) foi dada pela Equação (9), onde b é coeficiente linear da reta:

$$\sigma_0 = e^{(b/m)} \quad (9)$$

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

Figura 17: Exemplo arbitrário de curva $\ln[\ln(\frac{1}{1-P})]$ em função de $\ln \sigma$.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4.8 Caracterização dos CDPs de flexão por testes de Arquimedes

Após realizado o ensaio de flexão, corpos de prova remanescentes (fragmentos) de cada composição e de cada idade foram caracterizados em relação à densidade aparente e porosidade, seguindo a norma ASTM C20 - 00. Para isso, foram separados

12 fragmentos de corpos de prova do ensaio de flexão de cada sistema, que foram colocados em béqueres separados de acordo com cada composição. Em seguida, cada béquer foi preenchido com querosene até ultrapassar o nível dos corpos de prova. Aqui foi feita uma adaptação da norma, que recomenda água para os testes, a qual foi substituída por querosene, uma vez que o cimento, a cal e a cinza reagem com a água, o que pode causar

Os materiais permaneceram imersos em querosene por 24 horas. Passado esse tempo, foram pesados em balança hidrostática, ilustrada na Figura 18, anotando-se sua massa imersa. Posteriormente retirando-se o excesso de querosene com o auxílio de papel absorvente se determina a massa úmida e, por fim, foram secos em estufa, tendo sua massa seca medida em balança analítica. Com os dados de massa seca, massa úmida e massa imersa obtidos foi possível calcular os parâmetros representados pela Equação (10), pela Equação (11) e pela Equação (12):

$$\bullet \text{ Volume aparente da parte sólida: } V_{as} = \frac{M_s - M_i}{M_e} \quad (10)$$

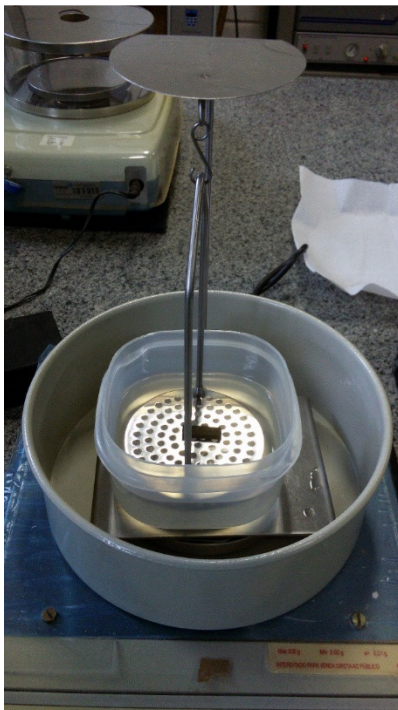
Onde M_s é a massa seca, M_i é a massa imersa e M_e a densidade do querosene ($0,76 \text{ g/cm}^3$ à 20°C)

$$\bullet \text{ Densidade aparente: } D_a = M_s/V_a \quad (11)$$

$$\bullet \text{ Porosidade aparente: } P_a = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \right) \times 100\% \quad (12)$$

Onde M_u é a massa úmida

Figura 18: Balança hidrostática utilizada para a medição da massa imersa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4.9 Teste de absorção de umidade

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

Para proceder esse teste, foram utilizados como amostras 5 fragmentos de corpos de prova de cada composição. Estes foram imersos em béqueres com água destilada, onde permaneceram por 24h. Após esse período foram retirados da água e o excesso de água foi tirado com o auxílio de papel absorvente. A quantidade percentual de água absorvida em relação à massa do CDP é dada pela Equação (13), onde m_2 é a massa do CDP saturado e m_1 a massa do CDP seco em estufa:

$$A = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100\% \quad (13)$$

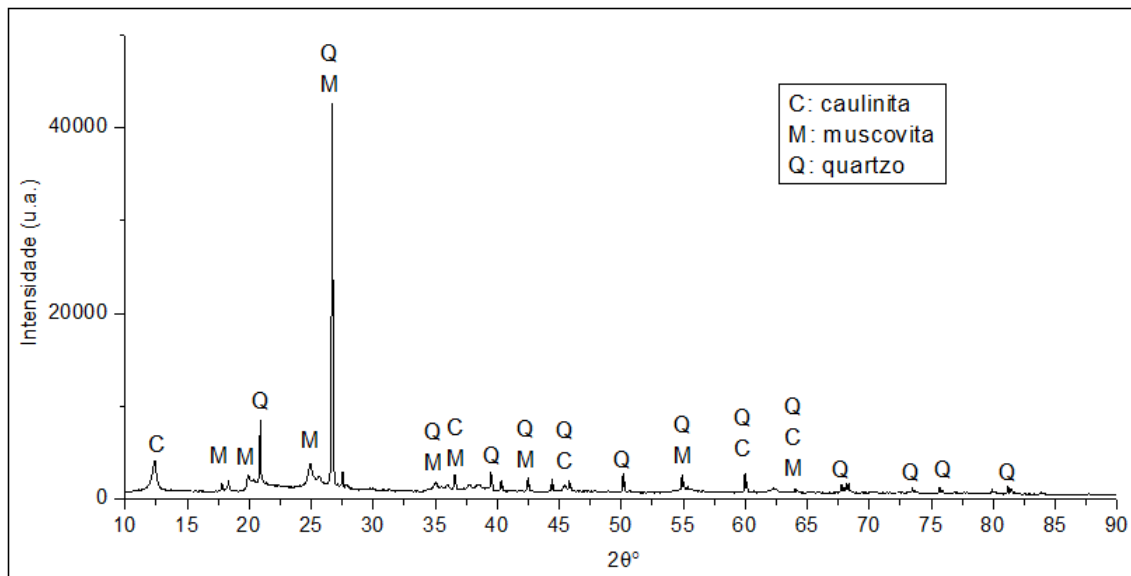
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

4.1.1 Argila

A Figura 19 ilustra o difratograma de raios X obtido da argila utilizada neste trabalho. Como a quantidade de picos é muito grande, foram ilustrados somente os principais picos de cada fase encontrada. Seus principais constituintes são o quartzo (Q), a muscovita (M) e a caulinita (C). Tanto o quartzo quanto os silicatos (muscovita e caulinita) foram citados como constituintes de argilas na revisão bibliográfica, estando esse resultado coerente com o que foi observado. O resultado também está de acordo com o encontrado por Ranieri (2007), quem analisou dois tipos de argila de pontos diferentes da cidade de Cunha, ambas apresentando os mesmos constituintes, como foi apresentado nas Figuras 1(a) e 1(b). No caso da argila desse trabalho, porém, não foram encontrados picos de gibbsita, mas a grande semelhança entre essa argila e as estudadas por Ranieri mostra uma formação mineralógica muito semelhante.

Figura 19: Difratograma de raios X da análise feita na argila utilizada nesse trabalho.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

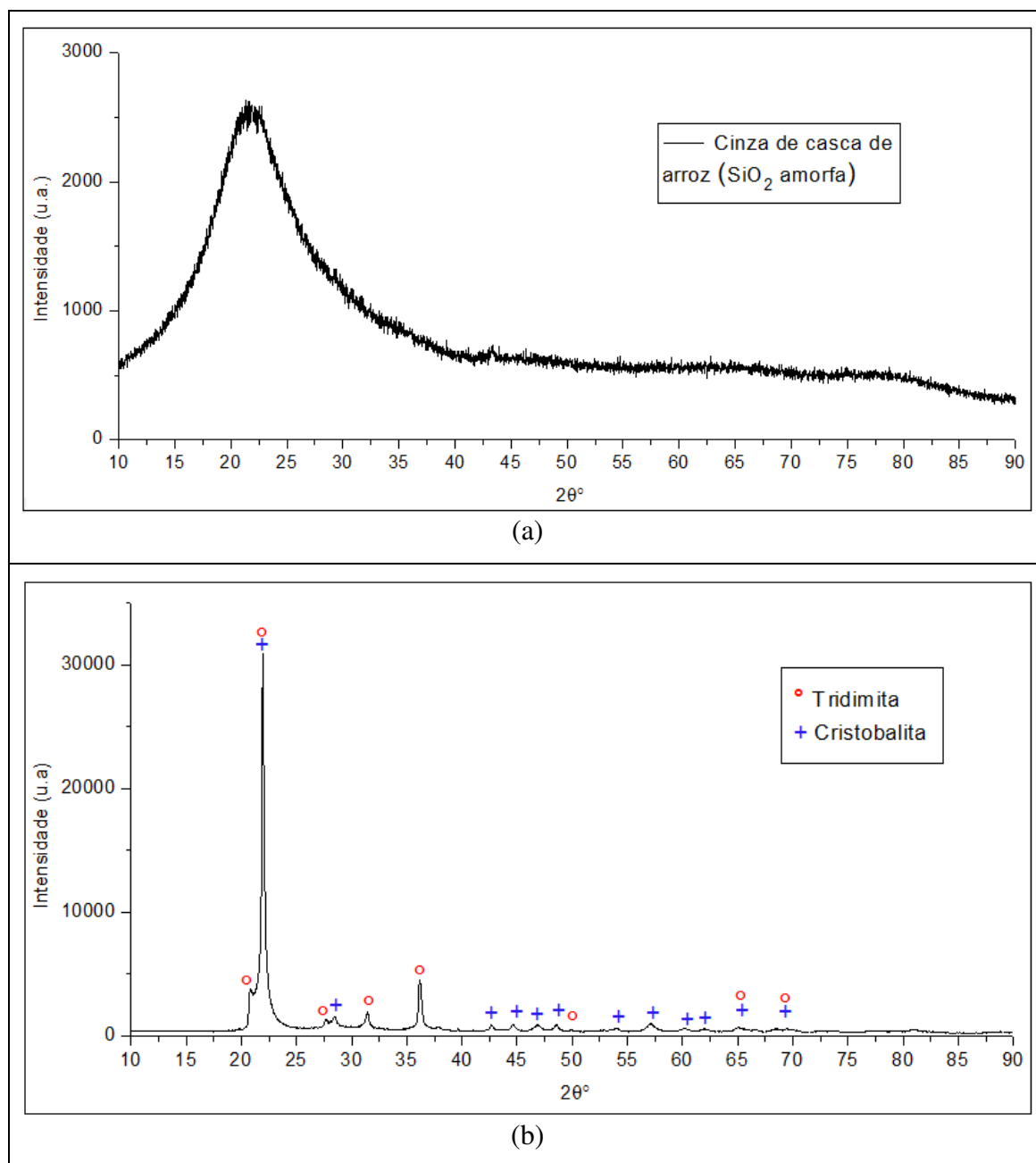
4.1.2 Cinza de casca de arroz

O resultado da análise por difratometria de raios X da cinza de casca de arroz está ilustrado na Figura 20(a). Nota-se que o difratograma é de um material tipicamente amorfo, pois não houve a formação de picos bem definidos.

Mesmo que não tenha sido definido o teor de amorficidade do material, outro fator que indica o caráter predominantemente amorfo da cinza é sua cor. De acordo Deshmukeh (2011), no que diz respeito à relação à cor da cinza com a cristalinidade da sílica presente nela, cinzas claras com tons próximos ao branco possuem sílica predominantemente amorfa. Por outro lado, cinzas com sílica predominantemente cristalinas apresentam cor roxa, que são obtidas com tratamentos térmicos acima de 900 °C. Após a análise de perda ao fogo a 1000 °C, a cor da cinza foi modificada para roxa. A diferença de tonalidade da cinza utilizada nesse trabalho antes e após a perda ao fogo é ilustrada nas Figuras 21(a) e 21(b). É importante citar que a cinza da Figura 21(a) é acinzentada e não branca, muito provavelmente pela presença de impurezas orgânicas que restaram após seu processamento. Posteriormente será discutida a análise de perda ao fogo, que irá mostrar se há ou não impurezas.

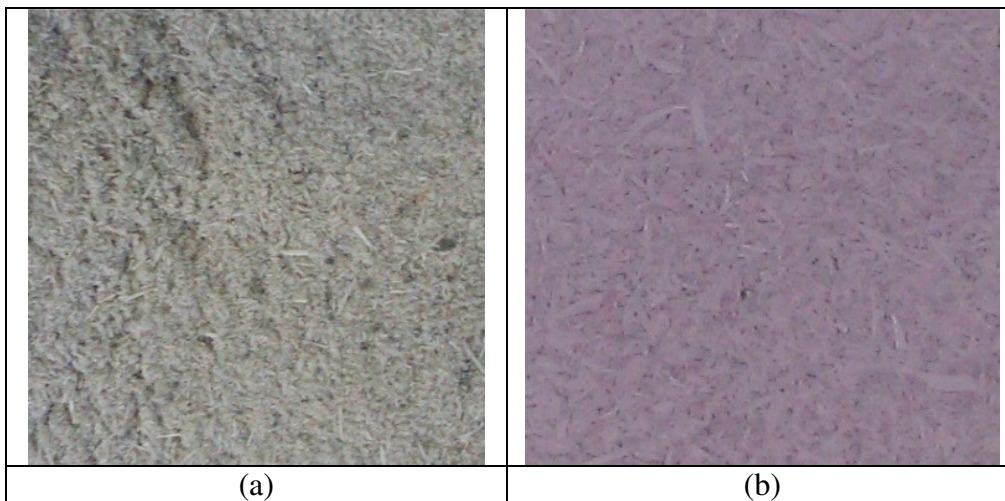
Para avaliar o que foi discutido por Deshmukeh (2011), também foi realizada a difratometria de raios X na cinza após perda ao fogo. Essa cinza, cujo difratograma está ilustrado na Figura 20(b), possui cristobalita e tridimita, que são fases cristalinas da sílica, corroborando para o que foi concluído por Deshmukeh (2011).

Figura 20: Difratoograma obtido pela análise da sílica de casca de arroz utilizada no trabalho, sendo (a) amorfa, calcinada a 600 °C e (b) após perda ao fogo a 1000 °C.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21: (a) cinza de casca de arroz utilizada nesse trabalho, produzida a 600°C e (b) cinza obtida a 1000°C, após análise de perda ao fogo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

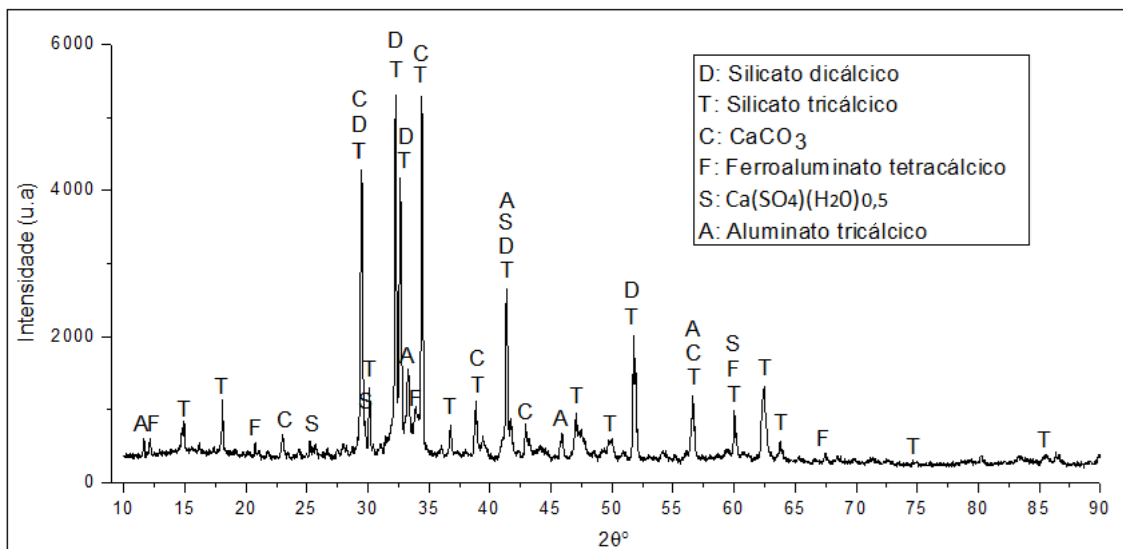
4.1.3 Cimento

A Figura 22 ilustra o difratograma de raios X do cimento utilizado no trabalho e suas respectivas fases. A quantidade de picos identificados pelo software SearchMatch foi muito alta. Por isso, para efeito de ilustração foram representados somente os principais picos das fases que foram identificadas pelo software. Essas fases condizem com a composição do cimento CP-V.

Foi possível encontrar os constituintes de maior interesse, que são os seus constituintes principais: o C_2S (D = silicato dicálcico) e o C_3S (T = silicato tricálcico). Também foram identificados picos de carbonato de cálcio (C = $CaCO_3$), que podem estar relacionados à adição desse material para promover um efeito *filler*. Por fim, mostram-se presentes também componentes secundários como o sulfato de cálcio semi-hidratado (S = $Ca(SO_4)(H_2O)_{0,5}$) e o C_3A (A= aluminato tricálcico).

Mesmo que não tenham sido quantificados esses componentes, a análise se mostrou eficiente em encontrar as fases esperadas.

Figura 22: Difratoograma do cimento utilizado e fases presentes.

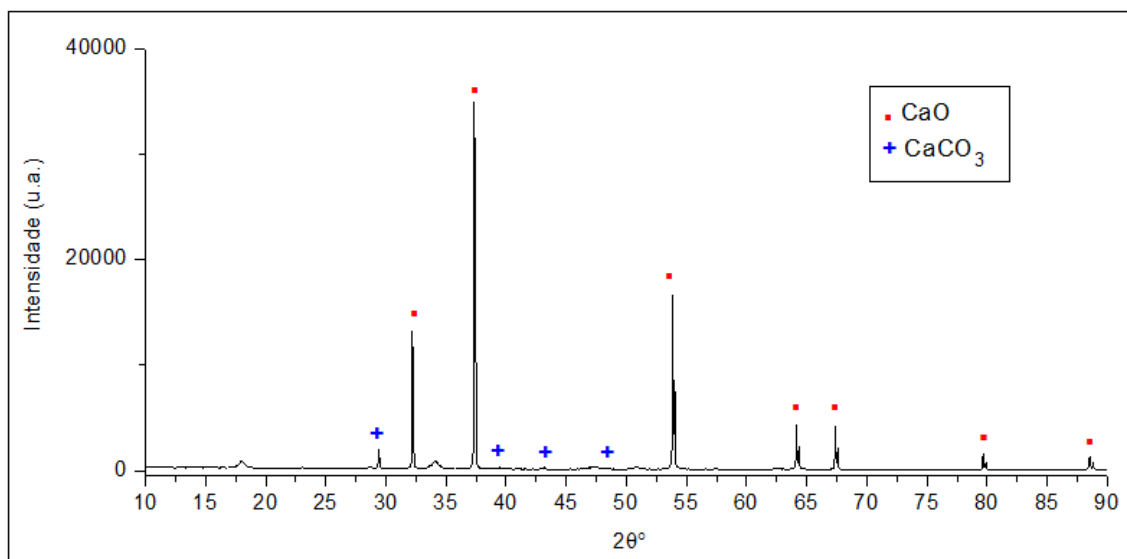


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.4 Cal

A Figura 23 ilustra o difratograma de raios X obtido para análise da cal. Nota-se a presença de picos de CaO e alguns picos de CaCO₃. O CaCO₃ encontrado pode estar presente como uma impureza do material, ou ainda, pode ter se formado pela reação da cal com a umidade e o gás carbônico ambiente, que levou a formação do composto. Mesmo tendo sido verificada a presença desse composto, optou-se por utilizar a cal nessas condições, dispensando processos térmicos de correção do material (calcinação) e, com isso, reduzindo os custos envolvidos e o consumo de energia, visto que o trabalho teve a proposta de desenvolver um tijolo ecológico.

Figura 23: Difratoograma de raios X da cal utilizada no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG DA ARGILA

Os dados granulométricos obtidos por peneiramento da argila utilizada no trabalho estão expostos na Tabela 5. Após o peneiramento, as frações mais finas da argila foram analisadas pelo método de sedimentação, obtendo-se o perfil granulométrico ilustrado na Figura 24. Com o auxílio da Tabela 5 e da Tabela 6, é possível observar que o solo utilizado nesse trabalho é argiloso, pois o material passa quase que em sua totalidade pelas peneiras de maiores aberturas, evidenciando um material muito fino.

Entretanto, para classificar um solo para uso em tijolos, são necessários não somente os dados de granulometria, mas também os dados de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade (Limites de Atterberg) desse solo. Com o auxílio da norma ABNT 10833 para solos utilizados em tijolos, têm-se as referências de valores para os Limites de Atterberg e para a granulometria do solo. Esses valores estão listados na Tabela 6, juntamente com os valores estimados para o solo utilizado nesse trabalho. Nota-se que a quantidade de material que passa na peneira de abertura de 75µm é maior que a estipulada pela norma (de 10% a 50%), o que sugere que o material é bem fino, como também foi observado na análise granulométrica. Esse comportamento não é

desejado em solos para uso em tijolos, uma vez que um solo bem graduado é mais indicado, pois confere melhores propriedades mecânicas para o tijolo.

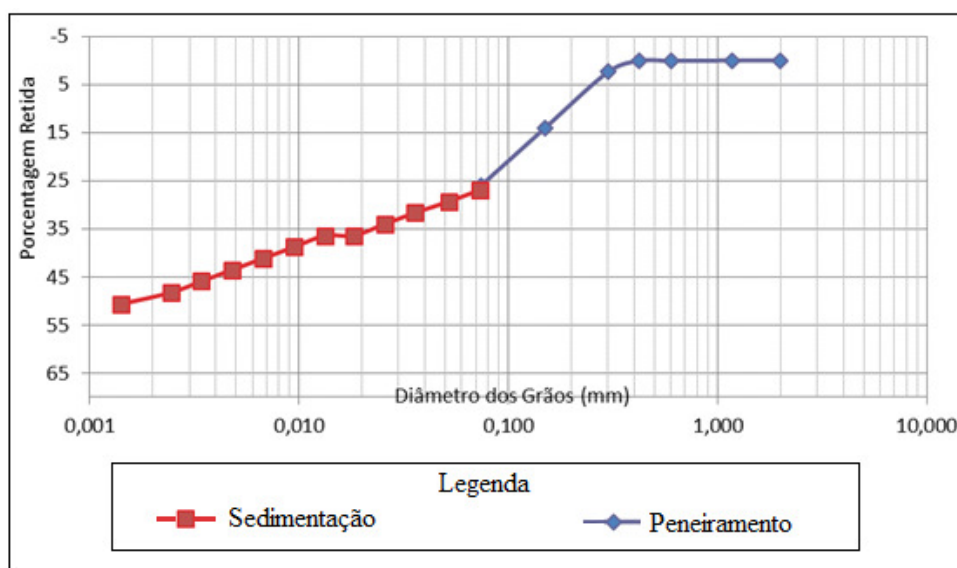
Tendo em vista o valor do Limite de Plasticidade, nota-se que esse está 2% acima do recomendado pela norma, sendo uma diferença muito baixa. O Limite de Liquidez, por sua vez, está dentro do limite recomendado pela norma.

Tabela 5: Perfil granulométrico da argila de Cunha utilizada no trabalho, de acordo com a análise de granulometria por peneiramento.

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

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24: Perfil granulométrico da argila de Cunha utilizada no trabalho, de acordo com a análise de granulometria por sedimentação e peneiramento (NBR 7181).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6: Comparativo entre as propriedades da argila exigidas pela norma ABNT NBR 10833 as estimadas para a argila utilizada nesse trabalho.

Propriedade	NBR 10833	Valor estimado
Material que passa pela peneira de abertura 4,75mm	100%	100%
Material que passa pela peneira de abertura 75 μ m	10% - 50%	73,97%
Limite de Liquidez (LL)	$\leq 45\%$	29%
Limite de Plasticidade (LP)	$\leq 18\%$	20%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise granulométrica e as medidas dos Limites de Atterberg também são importantes para a classificação do solo de acordo com a norma ASTM D3282, descrita na Tabela 7, onde se comprova que o solo utilizado nesse trabalho é mesmo um solo argiloso, classificado como A6.

Por fim, apesar do solo em questão ser classificado como argiloso, que pode ser tanto uma característica intrínseca como também pode ter sofrido moagem no processo de desaglomeração em moinho de bolas. Pretende-se aqui neste trabalho avaliar se a argila de Cunha pode ser usada nessas condições granulométricas com uma quantidade de 11% de cimento no máximo para o desenvolvimento de um tijolo ecológico.

Tabela 7: Classificação dos solos de acordo com a ASTM D3282.

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

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

4.3 DENSIDADE DAS MATÉRIAS-PRIMAS POR PICNOMETRIA LÍQUIDA

Os resultados de densidade encontrados por picnometria líquida são listados na Tabela 8.

Para avaliar o resultado de densidade da argila, foi tomado como referência o valor de densidade encontrado para argila caulínica da cidade de Guaratinguetá utilizada por Neto et. al. (2003) os quais encontram um valor equivalente a $2,81 \text{ g/cm}^3$ e que possui composição semelhante à argila caulínica utilizada nesse trabalho. Entretanto, é preciso levar em consideração que apesar de ambas as argilas serem semelhantes em composição, ainda possuem pequenas diferenças de constituintes, assim como também a quantidade de cada constituinte não é a mesma em ambas as argilas, levando a variações de densidade.

A densidade da cinza de casca de arroz utilizada nesse trabalho, por sua vez equivalente a $2,11 \text{ g/cm}^3$, está na faixa de valores de densidade da sílica amorfa estimados pelos autores Sturn et. al. (2016), equivalente a $2,26 \text{ g/cm}^3$ e Mejía (2016), equivalente a $2,04 \text{ g/cm}^3$.

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

Por fim, a densidade da cal, de $3,36 \text{ g/cm}^3$, está de acordo com as faixa de valores citada pelo fabricante, entre $3,0 \text{ g/cm}^3$ e $3,6 \text{ g/cm}^3$ (QUALICAL, 2016).

Tabela 8: Resultados de densidade obtidos por picnometria líquida.

Material	Densidade média (g/cm^3)	Desvio padrão (g/cm^3)
Argila	2,43	0,06
Cinza de casca de arroz	2,11	0,03
Cimento	2,90	0,02
Cal	3,36	0,03

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 PERDA AO FOGO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

Após o processo para a análise perda ao fogo o valor registrado para a massa de cinza de casca de arroz foi de 3,832g, o que representa uma variação de 0,172g em

comparação ao valor de massa inicial. Sendo assim, o valor de perda ao fogo é de $(0,172/4,004) * 100\% = 4,30\%$. Esse valor está relacionado à quantidade de impurezas presentes na cinza após seu processamento, as quais puderam ser eliminadas a 950°C. O valor está abaixo do máximo permitido para pozolanas para uso em concreto, que é de 6% de acordo com a ASTM C-618:12.

4.5 ENSAIOS DE FLEXÃO

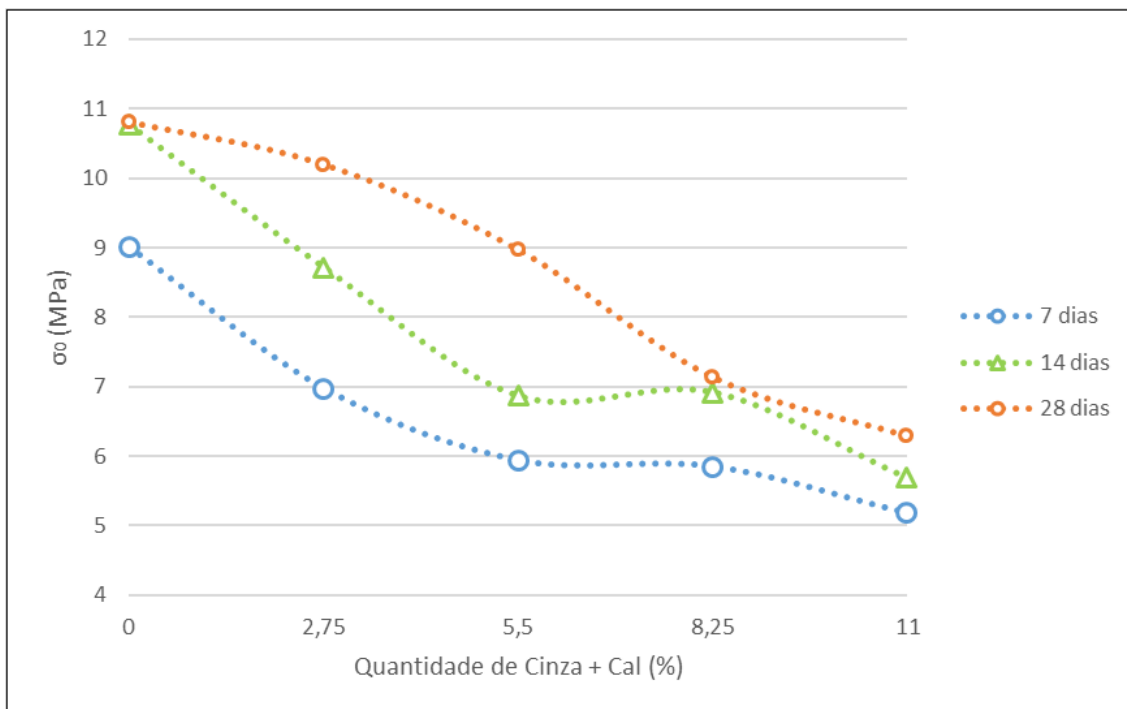
A Figura 25 ilustra os resultados dos ensaios de flexão para os corpos de prova nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias em todas suas variações de composição. Esse gráfico traz diversas informações acerca do comportamento desses materiais. Uma observação inicial indica a tendência de redução da resistência característica com a redução do teor de cimento e consequente aumento do teor de cinza mais cal, com exceção dos corpos de prova de CC5,5 e CC7,5 nas idades de 7 e 14 dias, que praticamente mantiveram os níveis de resistência para uma mesma idade.

Comparando-se as composições CC0,0 (sem cinza e cal) e CC11,0 (sem cimento), nota-se que o cimento contribui mais para o desenvolvimento de resistência mecânica do que a cinza e cal. Isso acontece porque o cimento é mais reativo e sua cinética de reação é maior, o que explica a queda nos níveis de resistência ao diminuir os teores de cimento.

Nota-se também pela Figura 25 que para uma mesma composição a resistência mecânica aumenta com o tempo. De acordo com Paulon (1971), os componentes do cimento Portland possuem esse comportamento de aumento de resistência mecânica em função do tempo, como pode ser observado na revisão bibliográfica na Figura 2, o que explica o comportamento dos materiais utilizados nesse trabalho. Na mesma Figura também é possível observar que a curva de desenvolvimento de resistência mecânica com o tempo é diferente para cada componente do cimento, onde os maiores níveis são alcançados pelo C₃S e C₂S, com maiores variações nas idades iniciais. Como o apresentado na revisão bibliográfica, esses são os dois principais componentes do cimento do tipo CP-V, sendo provavelmente os principais responsáveis pelo ganho de resistência mecânica nos materiais utilizados nesse trabalho.

Com não há uma norma de referência para resistência em flexão para tijolos, toma-se como uma base de comparação os requisitos da norma ABNT NBR 8491, que são 2,0 MPa para valor médio e 1,7 MPa para valor individual em compressão. Todos os materiais utilizados nesse trabalho apresentaram valores acima dos requisitados por essa norma e espera-se que em compressão os materiais também atendam essa norma, uma vez que o ensaio de flexão é mais crítico por envolver esforços indiretos de tração. Além disso, os corpos de flexão são muito delgados e ainda assim atingiram bons níveis de resistência mecânica.

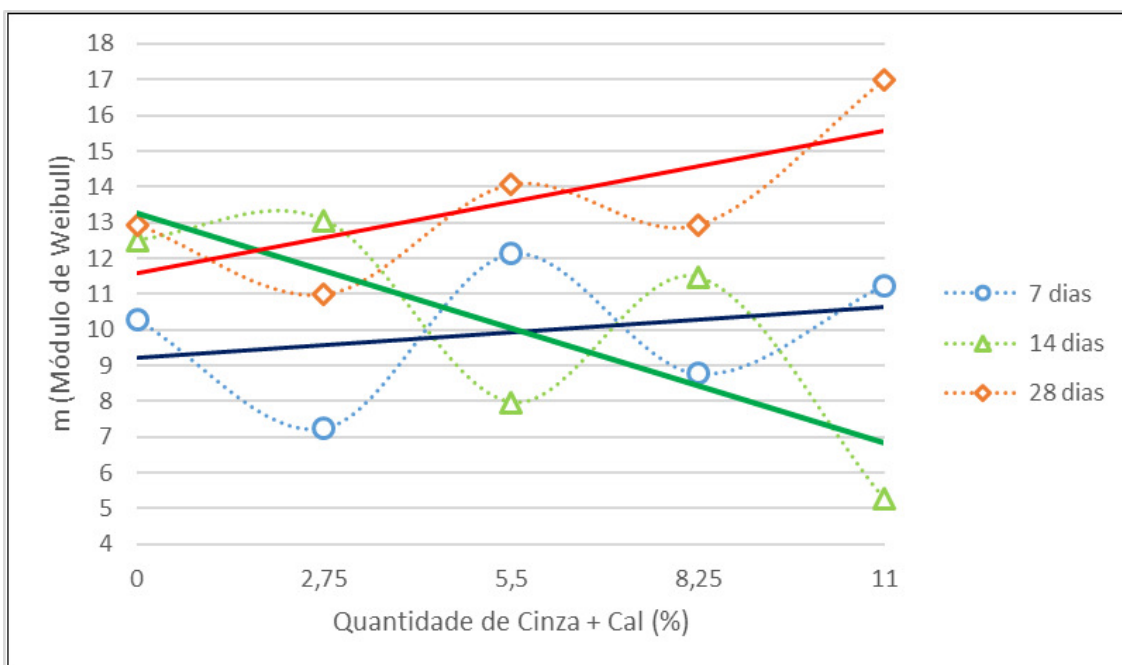
Figura 25: Resultados obtidos por ensaio de flexão em três pontos com materiais produzidos nesse trabalho com 0,0%, 2,75%, 5,5%, 8,25% e 11,0% de cinza mais cal aos 7 dias, 14 dias e 28 dias de idade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 26 ilustra os valores de módulo de Weibull (m) calculados por meio da análise estatística dos valores obtidos pelo ensaio de flexão. De acordo com Quercia (2016), o parâmetro módulo de Weibull (m) está relacionado com a distribuição de falhas no material. Sendo assim, valores mais elevados de m significam que os valores de resistência do material em questão estão muito agrupados e próximos aos outros. Por outro lado, valores menores de m tem o significado de que os valores de resistência do material em questão são mais dispersos (QUERCIA, 2016).

Figura 26: Resultados para o Módulo de Weibull (m) obtidos por tratamento estatístico dos dados adquiridos por meio de ensaios de flexão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados obtidos para o módulo de Weibull mostram uma não linearidade no comportamento da curva para todas as idades. Partindo da premissa passada por Quercia (2016), isso significa que os materiais de cada composição possuem diferentes graus de falhas internas, o que resulta em diferentes graus de dispersão dos resultados de resistência.

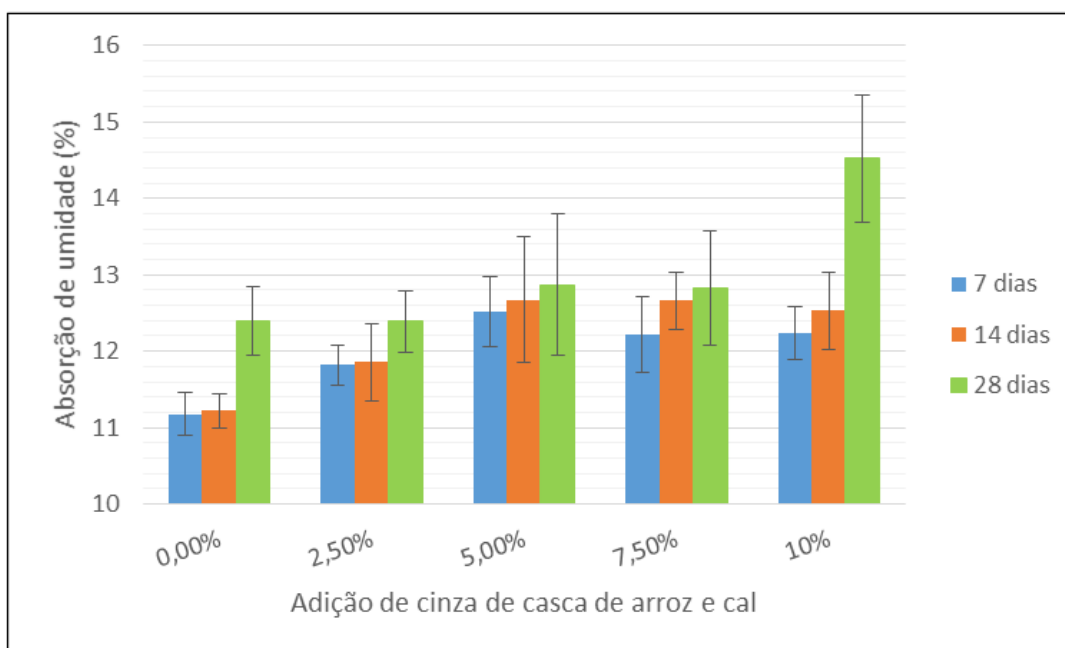
Apesar do comportamento não linear, é possível determinar a tendência de comportamento de cada curva com o auxílio de linhas de tendência. Nota-se então que para as idades de 7 e 28 dias houve uma tendência de aumento do módulo de Weibull

em função do aumento do teor de cinza de casca de arroz e cal, enquanto para a idade de 14 dias houve uma queda mais brusca desses valores em função do mesmo parâmetro. Também é possível observar que os maiores valores de m foram encontrados para as composições com 28 dias de idade, o que indica uma relação a idade com m . Isso pode ocorrer porque com o tempo os compostos cimentantes tendem a fechar defeitos no material, aumentando a homogeneidade do material e diminuindo a dispersão de resultados.

4.6 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE UMIDADE

A Figura 27 ilustra os resultados de absorção de umidade após 24 horas de imersão em água à temperatura ambiente. É possível notar que para uma mesma condição de idade, os níveis de absorção de água são maiores quanto maior for a quantidade de cinza de casca de arroz mais cal. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da cinza de casca de arroz ser muito porosa, como foi observado por Wei (2006) e mostrado na revisão bibliográfica na Figura 4. Sendo assim, quanto mais poros e quanto mais abertos eles são, maior a quantidade de água que podem absorver.

Figura 27: Dados de absorção de umidade dos corpos de prova após 24 horas de imersão em água à temperatura ambiente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 27 também evidencia o aumento dos níveis de absorção de água com o avanço da idade de uma mesma composição. Sendo assim, os corpos de prova com maiores valores médios de absorção são aqueles com 28 dias de idade. Apesar disso, todos os valores ainda estão abaixo do máximo permitido pela norma ABNT NBR 8491, que estipula que o valor médio de absorção de água para tijolos não estruturais deve ser de no máximo 20%, sendo o maior valor observado equivalente a 14,52%.

Esse ensaio foi importante não só para determinar a absorção de água pelos corpos de prova, mas também para ver o comportamento que tiveram perante a ação da água. Embora todos os corpos de prova tenham atingido níveis de absorção permitidos por norma, os corpos de prova da composição CC11,0 sofreram perdas de massa em contato com a mão após serem retirados da imersão, o que os desqualifica para a aplicação em tijolos.

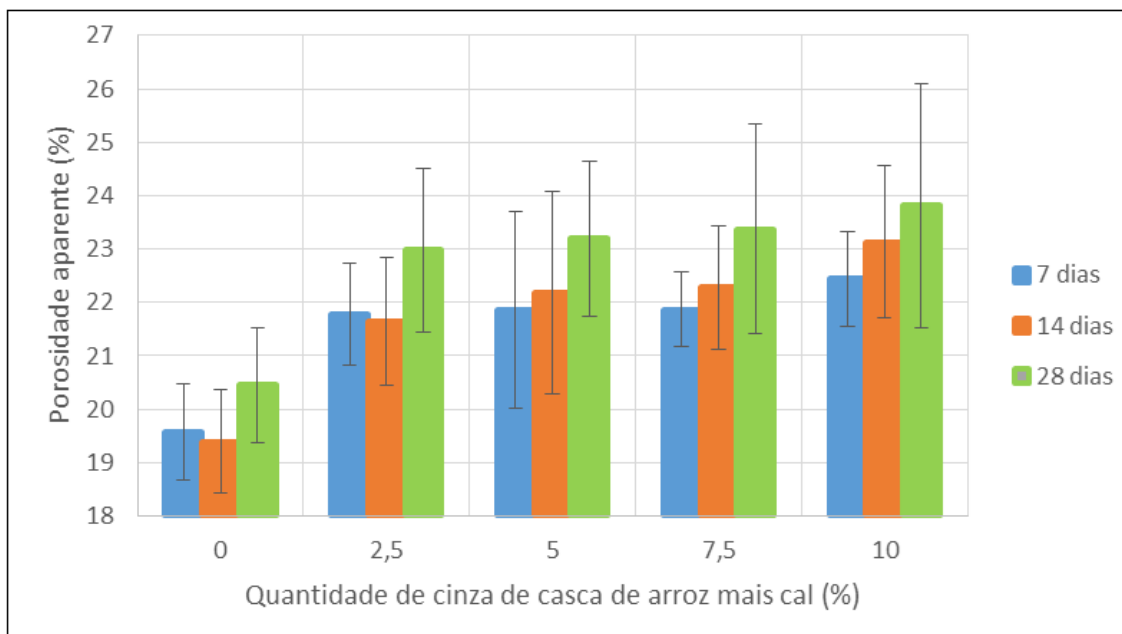
4.7 CARACTERIZAÇÃO POR ENSAIO DE ARQUIMEDES

A Figura 28 ilustra os resultados de porosidade obtidos após 24 horas de imersão em querosene à temperatura ambiente. Nota-se nessa Figura que a porosidade aumenta com a adição de cinza de casca de arroz, o que tem relação com a porosidade desse material, como foi mostrado na seção anterior. Esse comportamento vai ao encontro do que foi observado nos testes de absorção de água, podendo ser traçada uma relação de que quanto maior o teor de cinza de casca de arroz, maior a porosidade aparente do material e mais água ele absorve.

Nota-se também que para uma mesma composição a porosidade aparente aumentou conforme o avanço da idade do material. Esse aumento dos valores de porosidade aparente com o avanço da idade e com o aumento do teor de cinza mais cal tem relação com o comportamento mecânico desses materiais: quanto maior a porosidade aparente menos resistentes são, pois poros atuam como concentradores de tensões.

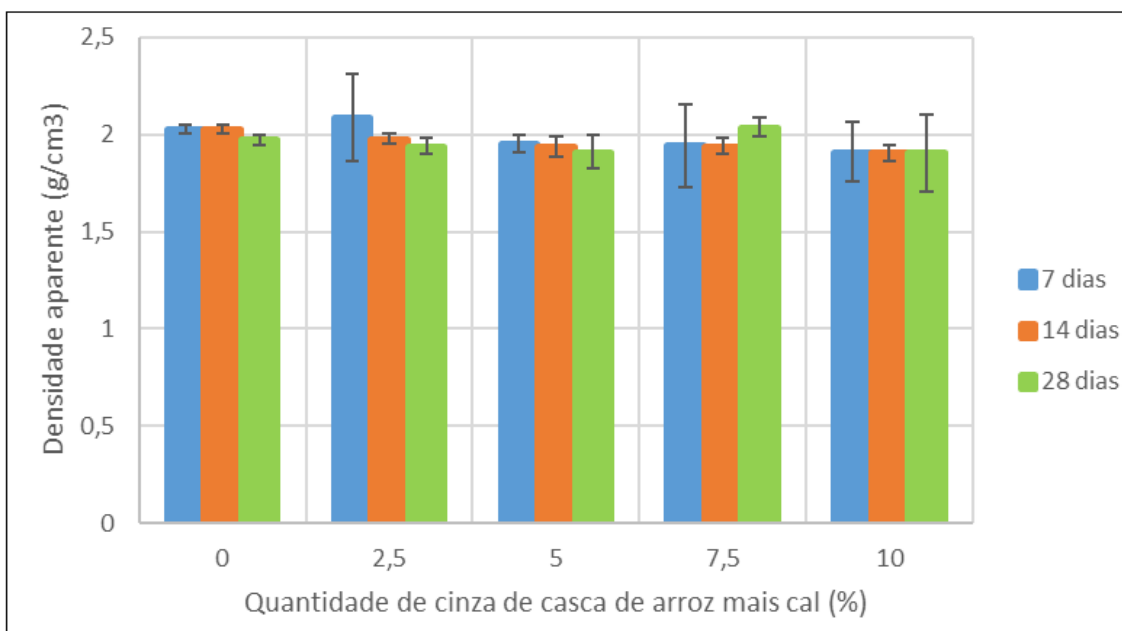
Por fim também é possível relacionar os valores de porosidade aparente com os valores de densidade aparente, apresentados na Figura 29. Essa relação faz sentido pois uma vez que o material possui mais cinza e cal, tem maior porosidade aparente e consequentemente menor densidade, o que foi observado nessa imagem.

Figura 28: Dados de porosidade aparente dos corpos de prova após 24 horas de imersão em querosene à temperatura ambiente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 29: Representação dos valores médios de densidade aparente dos materiais analisados pelo método de Arquimedes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Após a caracterização das propriedades físicas e mecânicas, e com o auxílio da literatura, foi possível concluir que:

- O tratamento térmico da cinza de casca de arroz a 600°C por 4 horas mostrou-se adequado para a obtenção de cinza amorfa, que foi analisada pelo método de difratometria de raios X e por análise de sua tonalidade citada em estudos levantados na revisão bibliográfica. Também foi observado pela análise de perda ao fogo que o tratamento atendeu a norma ASTM C-618-12, sendo eliminado 4,2% de material residual, abaixo dos 6% de limite indicado pela norma o que torna a cinza um material adequado para ser usado como pozolana.

- A dosagem de cimento se mostrou adequada, uma vez que os corpos de prova produzidos com até 11% de cimento obtiveram resultados de resistência mecânica acima do exigido pela norma ABNT NBR 8491 e valores de absorção de água abaixo do limite exigido pela mesma norma. Também foi possível identificar o comportamento mecânico e físico de variações de composição dentro dessa faixa de teor. Os resultados dos ensaios de flexão mostraram que todas as composições em todas as idades possuem valores de resistência característica elevados, sendo equivalentes a 10,81 MPa, 10,20 MPa, 8,97 MPa, 6,34 MPa e 6,30 MPa para as composições de CC0,0%, CC2,75%, CC5,5%, CC8,25% e 11,0% respectivamente, sendo esses dados aos 28 dias de idade, onde obtiveram os maiores valores.

- Os valores estimados de m foram elevados indicando um processamento dos corpos de prova bem controlado. O módulo de Weibull (m) mostrou ter relação com a idade do material, sendo maiores para as composições com 28 dias de idade devido a que as reações de hidratação vão se completando possivelmente eliminando defeitos nos corpos de prova.

- A análise de absorção de água após 24 horas em imersão mostrou que os materiais com cinza de casca de arroz e cal tendem a absorver mais água conforme o

teor dessa adição aumenta. Por outro lado, todos os valores estão abaixo do máximo permitido pela ABNT NBR 8491.

- A análise pelo método de Arquimedes permitiu verificar o aumento da porosidade aparente com o aumento do teor de cinza e a idade. Esses valores puderam ser relacionados com a resistência, a absorção de umidade e a densidade aparente do material. Em geral, quanto maior foi a porosidade aparente, maior foi a absorção de umidade, enquanto a resistência mecânica e a densidade aparente se mostraram menores.

- Por fim, a composição com 8,75% de cinza mais cal se mostrou a mais adequada, substituindo 75% de cimento em comparação com a composição de referência. Isso porque apesar de todos os materiais terem atingido níveis satisfatórios de resistência mecânica e absorção de água, é interessante utilizar a composição com a maior substituição de cimento possível. Entretanto, o uso da composição com substituição completa de cimento por cinza de casca de arroz e cal (isto é, a CC11,0) não se mostrou adequada, uma vez que sofreu um processo de desagregação de partículas após 24 horas de exposição à água, não sendo um material seguro para a aplicação em tijolos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Analisar a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz e fazer análise para a detecção de C-S-H formada a partir da reação entre a cinza e a cal;
- Quantificar por meio de uma técnica como a de refinamento Rietveld as fases presentes nas matérias-primas, isto é, na argila, no cimento, na cal e na cinza;
- Avaliar por termogravimetria diferentes proporções de cinza e cal para analisar a proporção ideal onde ocorrerá a reação completa entre os componentes;
- Fazer análise granulométrica da cinza de casca de arroz, da cal e do cimento, que pode mostrar mais informações acerca do comportamento das amostras;
- Construir as curvas de Bigot para auxiliar o processo de secagem de cada umas das composições avaliadas neste trabalho;
- Realizar a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas amostras, para analisar microestrutura dos corpos de prova e a interação entre as matérias primas às diferentes idades;
- Realizar os mesmos estudos com solo arenoso ao invés de solo argiloso como o proposto neste trabalho;
- Realizar o estudo com tijolos em formato comercial ao invés de corpos de prova na forma de barras como proposto neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AQEL, M. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. **Construction and Building Materials**. v 113. p359-368. 2016.

AHMARI, S., Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. **Construction and Build Materials**. v. 29. p. 323-331. 2015.

ALBUQUERQUE, L. Q. C., et. al. Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com montículos do cupim *Cornitermes cumulans*. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 32, n. 2, p. 553-560, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618-12: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Fabricação de tijolos-solo cimento com a utilização de prensas manuais. Publicações ABCP. São Paulo. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12253: Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12653: Materiais Pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

BARROS, H. C., **Fabricação de tijolos prensados com agregados reciclados de telhas cerâmicas, cimento Portland e cinza de casca de arroz**. 2012. 122f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso. UFMT, Cuiabá. 2012.

BORIES, C., et. al, Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. 2015. **Construction and Building Materials**, vol 91, p. 158-163. 2015.

BOSILJKOV, V. K. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**. v. 33. p.1279-1286. 2003.

BUDENBERG, E. R. **Caracterização da sílica amorfa extraída da casca de arroz obtida por pré-hidrólise ácida e calcinação, e sua aplicação em borracha de**

estireno-butadieno (SBR). 2013. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, USP, Lorena, 2013.

CONAB, 2015. **A cultura do arroz**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_03_01_16_56_00_a_cultura_do_arroz_-_conab.pdf. Acesso em: 14/04/2016.

DELLA, V. P. et al. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 6, p. 778-782, 2001.

DESHMUKH, P. et al. Determination of Silica Activity Index and XRD, SEM and EDS Studies of Amorphous SiO₂ Extracted from Rice Husk Ash. **Indian Institute of Metals**. v. 65. p. 63-70, 2012.

ENTEICHE, A.A. **Suelo-cimento, su aplicacion em la edificacion**. Bogotá. CINVA. 1963.

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

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

FERREIRA, R. C., OLIVEIRA, M. F. Incorporação de resíduos vegetais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de misturas de solo cimento para fins de construção rural. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v 37. n4. p.204-213, 2007.

FONSECA, E. S. et. al. Associação entre morfologia de trincas em pisos cerâmicos e seu comportamento mecânico em fratura. **Cerâmica**. vol 61, 303-308. 2015

GHANSEL, O., Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. **Energy and Buildings**. vol. 102, p. 217-224. 2015.

GRANDE, F. M., **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem a adição de sílica ativa**. 2003. 118f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo. USP, São Carlos. 2003.

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

IBGE. **Produção agrícola municipal – lavoura temporária – 2013**. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=351840&idtema=137&search=sao-paulo%7Cguaratingueta%7Cproducao-agricola-municipal-lavoura-temporaria-2013>. Acesso em: 06/03/2016.

KASMI, S. M. S, et. al. Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk. **Construction and Building Materials**. v. 120. p. 29-41. 2016.

MASSAZZA. F. **Pozzolana and pozzolanic cements**. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition. 1998.

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

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico do setor de transformação de não-metálicos, 2015**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/Anu%C3%A1rio+Estat%C3%A1stico+do+Setor+de+Transforma%C3%A7%C3%A3o+dos+N%C3%A3o+met%C3%A1licos+2015.pdf/3ae38c3d-d37f-49cd-9586-bcef858914c6>. Acesso em 14/04/2016.

MINISTÉRIO DA CULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2015. **Projeções do agronegócio**. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/PROJECOES_DO_AGRONEGOCIO_2025_WEB.pdf. Acesso em 14/04/2016.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 151p. Dissertação (Mestre em Engenharia) Universidade de São Paulo. São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo. 2011.

MEJÍA, J. M. Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder. **Journal of Cleaner Production**. v 118. p. 133-139. 2016.

NETO, D. H., et. al. **Otimização dos parâmetros de prensagem uniaxial para argilas obtidas na região de Guaratinguetá**. In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2013. João Pessoa. *Anais...* João Pessoa, 2013.

NORTON, F. H. **Introdução a Tecnologia Cerâmica**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1973.

O VALE. **Seca ameaça reduzir em 40% produção de arroz na RMVale**. 2016. Disponível em: <http://www.ovale.com.br/seca-ameaca-reduzir-em-40-produc-o-de-arroz-na-rmvale-1.578252>. Acesso em 02/03/2016.

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

QUALICAL 2016. **Cal hidratada e cal virgem**. Disponível em: <http://www.quallical.com.br/Apostila%20cv.pdf>. Acesso em 08/06/2016.

QUERCIA, G. et. al. **Weibull statistics applied to tensile testing for oil well cement compositions.** Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol>. Acesso em 08/09/2016.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Cimento nobre com casca de arroz.** Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2000/10/01/cimento-nobre-com-casca-de-arroz/>. Acesso em 14/04/2016.

RANIERI, M. G. A., **Caracterização tecnológica das argilas da cidade de Cunha para fins de cerâmica artística.** 2010, 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo. UNESP, Guaratinguetá, 2007.

SACA, N. Behavior of ternary blended cements containing limestone filler and fly ash in magnesium sulfate solution at low temperature. **Construction and Build Materials.** v. 71. p. 246-253. 2014.

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

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

SHEN, Y. Porous silica and carbon derived materials from rice husk pyrolysis char. **Microporous and Mesoporous Materials.** v. 188. p. 46-76. 2014.

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

STURN, P. et. al. Synthesizing one-part geopolymers from rice husk ash. **Construction and Building Materials.** v 124. p. 961–966. 2016.

TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações nas suas propriedades pela adição de resíduos sólidos.** 2006, 182f. Tese (Livre docência em Física) – Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. UNESP, Presidente Prudente, 2007.

UKWATTA, A., et. al. Possible use of biosolids in fired-clay bricks. **Construction and Build Materials.** v. 91. p. 86-93. 2015.

VIRUTHAGIRI, G., et. al. Spectroscopic investigation on the production of clay bricks with SCBA waste. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.** v. 149. p. 468-475. 2015.

XU, W., et. al. Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste. **Construcyion and Buildings Materials**. v85. p. 90-101. 2015.

WEI, J., MEYER, C. Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. **Concret and Cement Resarch**. v. 81. p. 94-111. 2016.

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

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS COMPOSIÇÕES

Tomando como base as seguintes informações:

- Relação molar de CaO/SiO₂: 1,5
- Densidade do CaO: 3,36 g/cm³
- Densidade do SiO₂: 2,11 g/cm³
- Massa molar do CaO: 56,08 g/mol (logo, 1,5 mol equivale à 84,12 g/mol)
- Massa molar do SiO₂: 60,08 g/mol
- Volume de 1 mol de SiO₂ = 60,08 [g] / 2,11 [g/cm³] = 28,49 cm³
- Volume de 1,5 mol de CaO = 84,12 [g] / 3,36 [g/cm³] = 25,04 cm³
- Volume de 1 mol de SiO₂ + CaO = 28,49 cm³ + 25,04 cm³ = 53,53 cm³

Calcula-se a fração volumétrica de CaO e SiO₂ em uma mistura de 1 mol de SiO₂ mais 1,5 mol de CaO, logo:

$$\text{- Fração de 1,5 mol de CaO} = 25,04 \text{ cm}^3 / 53,53 \text{ cm}^3 = 0,47$$

$$\text{- Fração de 1 mol de SiO}_2 = 28,49 \text{ cm}^3 / 53,53 \text{ cm}^3 = 0,53$$

A partir dessas proporções, tem-se então a fração volumétrica de CaO e SiO₂ nas composições usadas nesse trabalho, que são:

→ **CC2,75** (2,75% de CaO mais SiO₂):

$$\text{CaO: } 0,47 \times 2,75 = 1,29\%$$

$$\text{SiO}_2: 0,53 \times 2,75 = 1,46\%$$

Total: 2,75%

→ **CC5,5** (5,55% de CaO mais SiO₂):

$$\text{CaO: } 0,47 \times 2,75 = 2,59\%$$

$$\text{SiO}_2: 0,53 \times 2,75 = 2,92\%$$

Total: 5,5%

→ **CC8,25** (8,25% de CaO mais SiO₂):

$$\text{CaO: } 0,47 \times 2,75 = 3,88\%$$

$$\text{SiO}_2: 0,53 \times 2,75 = 4,37\%$$

Total: 8,25%

→ **CC11,0%** (11,0% de CaO mais SiO₂):

CaO: $0,47 \times 2,75 = 5,17\%$

SiO₂: $0,53 \times 2,75 = 5,83\%$

Total: 11,0%