INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO E DA QUALIDADE DO TIJOLO ECOLÓGICO PRODUZIDO NA REGIÃO DE TERESINA-PI

FRANCISCA DAS CHAGAS OLIVEIRA

Orientador: Prof. Roberto Arruda Lima Soares
Coorientador: Prof. Gilvan Moreira da Paz

TERESINA-PIAUÍ

2021

FRANCISCA DAS CHAGAS OLIVEIRA

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO E DA QUALIDADE DO TIJOLO ECOLÓGICO PRODUZIDO NA REGIÃO DE TERESINA-PI

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração:
Caracterização e Processamento de Materiais.

Orientador: Prof. Roberto Arruda Lima Soares
Coorientador: Prof. Gilvan Moreira da Paz

TERESINA-PIAUÍ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Oliveira, Francisca das Chagas

O48e Estudo de otimização da produção e da qualidade do tijolo ecológico produzido na região de Teresina-PI / Francisca das Chagas Oliveira. - 2021.

88 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal doPiauí, Campus Teresina Central, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares.
Coorientador: Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz.

1. Tijolo ecológico. 2. Formulações. 3. Processo produtivo. 4. Otimização. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

FRANCISCA DAS CHAGAS OLIVEIRA

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO E DA QUALIDADE DO TIJOLO ECOLÓGICO PRODUZIDO NA REGIÃO DE TERESINA-PI

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares (Orientador)

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

_____

Prof. Dr. Érico Rodrigues Gomes

Instituto Federal do Piauí

_____

Prof. Dr. Raimundo José de Sousa Castro

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

“O simples aspecto da mulher revela que ela não é destinada
nem aos grandes trabalhos intelectuais,
nem aos grandes trabalhos materiais.
Mas quando uma pessoa pertencente ao sexo no qual,
de acordo com nossos costumes e preconceitos,
é forçada a enfrentar infinitamente mais dificuldades do que os homens
para familiarizar-se com essas pesquisas dificílimas,
e consegue, com êxito, penetrar nas partes mais obscuras delas,
tendo para isso, de superar todas essas barreiras,
então essa pessoa tem, necessariamente, a mais nobre coragem,
os mais extraordinários talentos e uma genialidade superior.”
(Gauss, numa carta a Sophie Germain)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que está sempre ao meu lado protegendo a mim, a minha família e os meus amigos nesse período tão difícil de pandemia.

Aos meus pais Deusanira (***In memoriam***) e Antonio (***In memoriam***) ambos de extrema importância na minha vida e a toda minha família que sempre me apoia com todo amor e carinho.

Aos amigos Heitor Fernandes, Daniel Ribeiro e Milton Falcão por me ajudar durante as etapas da pesquisa sempre com muita paciência e atenção.

As minhas amigas Diná Neres, Glaziane Soares e Carininy Lopes por acreditar e incentivar os meus sonhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí pela oportunidade de crescimento científico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares pelos ensinamentos e confiança. Ao meu coorientador Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz pelo incentivo e muita paciência.

Aos professores e aos técnicos dos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM), pelas oportunidades oferecidas e por compartilharem conhecimentos essenciais para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao meu grupo de Cerâmica do coração e ao Frederico Marques pela amizade, pelos momentos compartilhados e pela ajuda durante as etapas da pesquisa.

RESUMO

O tijolo ecológico é composto por água, solo e cimento, fácil processo de fabricação, curto prazo de construção e baixo custo, não é submetido à queima, o mesmo passa por uma prensa hidráulica. A produção do tijolo ecológico no Brasil está em ascensão, porém no estado do Piauí é pouco conhecido e produzido. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é analisar o processo de produção do tijolo ecológico propondo melhorias desde as matérias-primas aplicadas até a formulação de um traço por meio de experimentos aplicando um processo de otimização que busque qualidade, visando à diminuição de desperdício do material empregado aumentando a qualidade do produto final, tanto para manter o tijolo ecológico no mercado quanto para torná-lo um produto competitivo frente a outros estados. Inicialmente caracterizou-se as matérias-primas utilizadas para a fabricação dos tijolos, realizando os ensaios preliminares propostos por Taveira (1987) e pelo CEPED (1999), físicos, químicos e mineralógicos. Em seguida, foram produzidos os corpos de prova de solo-cimento sob uma pressão de compactação 50MPa, com 4 tipos de formulações composto por cimento, argila e areias. Foram realizados os ensaios de absorção de água, durabilidade por imersão e secagem, desempenho térmico e resistência à flexão de três pontos. Ao final do estudo foi possível observar que para produção do tijolo ecológico de qualidade faz-se necessário conhecer o tipo de solo mais adequado através de análises laboratoriais, ajustar a pressão de compactação e ter sempre a certificação da qualidade do tijolo através de ensaios mecânicos normatizados.

Palavras-chave: Tijolo Ecológico, Formulações, Processo Produtivo, Otimização.

ABSTRACT

The ecological brick is composed of water, soil and cement, easy manufacturing process, short term construction and low cost, is not subjected to burning, it goes through a hydraulic press. The production of ecological brick in Brazil is on the rise, but in the state of Piauí it is little known and produced. In view of the above, the objective of this work is to analyze the production process of the ecological brick proposing improvements from the applied raw materials to the formulation of a trace through experiments applying an optimization process that seeks quality, aiming at reducing the waste of the material employed increasing the quality of the final product, both to keep the ecological brick in the market and to make it a competitive product against other states. Initially, the raw materials used for the manufacture of bricks were characterized, performing the preliminary tests proposed by Taveira (1987) and CEPED (1999), physical, chemical and mineralogical. Then, soil-cement specimens were produced under a 50MPa compaction pressure, with 4 types of formulations composed of cement, clay and sands. The tests of water absorption, durability by immersion and drying, thermal performance and bending resistance of three points were performed. At the end of the study, it was possible to observe that for the production of quality ecological brick it is necessary to know the most appropriate type of soil through laboratory analyses, adjust the compaction pressure and always have the certification of the quality of the brick through standardized mechanical tests.

Keywords: Ecological Brick, Formulations, Production Process, Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Casa construída com tijolos ecológicos.....20

Figura 2 - Localização da Jazida da Serra do Gavião em Teresina-PI.....26

Figura 3 - Areia fina, Areia média e Argila.....27

Figura 4 - Retração inferior a 2cm.....28

Figura 5 - Apresentação de trincas 28

Figura 6 - a) Argila entre os dedos e b) marca dos dedos bem definida 29

Figura 7 - Bola a 1m de altura.....30

Figura 8 - Ensaio do vidro.....31

Figura 9 - Bola esmagada.....32

Figura 10 - Cordão com 5mm.....32

Figura 11 - Bolo antes de ser golpeado.....33

Figura - Pastilha após secagem.....34

Figura 13 - Aparelho de Casagrande.....35

Figura 14 - Ensaio LP.....35

Figura 15 - Ensaio de granulometria.....36

Figura 16 - Preparação para ensaio de FRX.....37

Figura 17 - Preparação da mistura.....38

Figura 18 - Moldagem dos corpos de prova.....36

Figura 19 - Prensa hidráulica - IFPI.....41

Figura 20 - Prensa hidráulica - olaria.....41

Figura 21 - Início do processo de cura.....42

Figura 22 - a) Peso seco e b) Peso úmido.....43

Figura 23 - Corpos de prova imersos por 5h.....44

Figura 24 - Minicasa de tijolo cerâmico.....47

Figura 25 - a) e b) Minicasa de tijolos cerâmicos 20 x 9 cm 47

Figura 26 - Minicasa de blocos ecológicos.....48

Figura 27 - a) e b) Minicasa de blocos ecológicos 19 x 9 cm.....48

Figura 28 - Ensaio de flexão em andamento.....50

Figura 29 - Etapas do modelo matemático.....51

Figura 30 - Gráfico com resultado LL.....55

Figura 31 - Gráfico da curva granulométrica da argila.....58

Figura 32 - Gráfico da curva granulométrica da areia fina.....59

Figura 33 - Gráfico da curva granulométrica da areia média.....60

Figura 34 - Gráfico da análise mineralógica da argila.....63

Figura 35 - Gráfico da análise mineralógica da areia fina.....64

Figura 36 - Gráfico da análise mineralógica da areia média.....64

Figura 37 - Gráfico do resultado do ensaio de absorção de água.....66

Figura 38 - Gráfico das perdas de massa no ensaio de durabilidade.....68

Figura 39 - Gráfico da temperatura média por turno para os modelos das minicasas.....70

Figura 40 - Resultado da resistência à flexão dos corpos de prova.....71

Figura 41 - Gráfico de regressão para F1 (FP).....74

Figura 42 - Gráfico de regressão para F2.....74

Figura 43 - Gráfico de regressão para F3.....75

Figura 44 - Gráfico de regressão para F4 75

Figura 45 - Gráfico das médias dos grupos de corpos de prova fabricados de acordo com sua composição e tempo de cura.....77

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabelas:

Tabela1 - Especificação do solo para produção do tijolo ecológico NBR 10832/13.....19
Tabela 2 - Formulações utilizadas.....38
Tabela 3 - Análise Química por Fluorescência de Raios-x da argila.....61
Tabela 4 - Análise Química por Fluorescência de Raios-x da areia fina e média.....62
Tabela 5 - Concentração das fases cristalinas (%) da argila.....65
Tabela 6 - Valores de absorção de água em média.....66
Tabela 7 - Perda de massa por durabilidade em média.....67
Tabela 8 - valores médios dos ensaios de resistência a flexão dos corpos de prova.....71
Tabela 9 - Equações geradas pelos gráficos de F1, F2, F3 e F4.....73
Tabela 10- Teste de Normalidade dos dados.....77
Tabela 14- Estatística do Teste de Kruskal-Wallis.....78

Quadros:

Quadro 1 - Tipos de tijolo ecológico produzidos e comercializados.....21
Quadro 2 - Resultados: Ensaio da caixa – retração do solo, Ensaio do vidro, Hand test. E Teste da bola no solo..... 53
Quadro 3 - Interpretação dos ensaios expedidos do solo.....54
Quadro 4 - Resultados dos ensaios: da fita, do cordão, do bolo e resistência seca aplicados na argila.....54
Quadro 5 - Determinação da umidade – LL.....55
Quadro 6 - Limite de Plasticidade.....56
Quadro 7 - Condição plástica da argila.....56
Quadro 8 - Ensaio de granulometria da argila.....57
Quadro 9 - Classificação da areia quanto ao módulo de finura.....59
Quadro 10 - Resultado da granulometria do agregado miúdo.....53
Quadro 11- Resultado da granulometria do agregado miúdo.....60
Quadro 12 - Temperaturas em °C para o modelo construído com bloco ecológico.....69
Quadro 13 - Temperaturas em °C para o modelo construído com tijolo cerâmico.....69
Quadro 14 - Médias dos grupos de tijolos fabricados de acordo com sua composição e tempo de cura.....76
Quadro 15 - Teste de Kruskal-Wallis - Classificações.....78
Quadro 16 - Teste T para comparação de médias entre os grupos.....79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
UFPI	Universidade Federal do Piauí
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
DRX	Difração de raios-X
FRX	Fluorescência de raios-X
MPa	Megapascal
AA	Absorção de água
ABCP	Associação brasileira de cimento portland

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

∫ Integral

°C Grau Celsius

Sumário

1 INTRODUÇÃO 16
2 OBJETIVOS 17
2.1 OBJETIVO GERAL 17
2.1.1 Objetivos Específicos 17
3 REFERENCIAL TEÓRICO 18
3.1 TIJOLO ECOLÓGICO 18
3.2 MATÉRIAS-PRIMAS 22
3.2.1 Argila 22
3.2.2 Cimento 22
3.2.3 Areia 23
3.3 OTIMIZAÇÃO 24
4 METODOLOGIA 25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS 26
4.1.1 Ensaio da caixa – retração do solo 26
4.1.2 Teste da determinação da umidade ótima em campo (hand test.) 27
4.1.3 Ensaio da determinação da umidade ótima (teste da bola no solo) 28
4.1.4 Ensaio do vidro 29
4.1.5 Ensaio do cordão 30
4.1.6 Ensaio da fita 31
4.1.7 Ensaio do bolo 31
4.1.8 Ensaio da resistência seca 32
4.1.9 Limite de liquidez e Limite de plasticidade 33
4.1.10 Granulometria das matérias-primas 34
4.1.11 FRX - Ensaio de fluorescência de raios- x 35
4.1.12 DRX - Ensaio de difração de raios-x 36
4.2 FORMULAÇÕES PROPOSTAS 36
4.3 PROCESSO DE PREPARAÇÃO DA MISTURA 36
4.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 37
4.5 PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO 38
4.6 PROCESSO DE CURA 39
4.7 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA 40
4.8 ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM 41

4.9 DESEMPENHO TÉRMICO 43
4.10 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE TRÊS PONTOS 46
4.11 MODELO MATEMÁTICO RELACIONADO AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO 48
4.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA RELACIONADA AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 50
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS 50
5.1.1 Caracterização da argila 50
5.1.1.1 Ensaios Preliminares.....50
5.1.1.2 Limite de liquidez e Limite de plasticidade (LL e LP).....52
5.1.1.3 Índice de plasticidade (IP) 54
5.1.2 Granulometria das matérias-primas 55
5.1.2.1 Granulometria da Argila.....55
5.1.2.2 Granulometria das Areias.....56
5.1.3 Fluorescência de raios – x das matérias-primas.....60
5.1.3.1 FRX da argila 60
5.1.3.2 FRX das areias.....60
5.1.4 Difratograma de raios-x das matérias-primas 61
5.1.4.1 DRX da Argila.....61
5.1.4.2 DRX das areias 62
5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....64
5.3 ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM 66
5.4 CONFORTO TÉRMICO.....67
5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE TRÊS PONTOS 69
5.6 MODELO MATEMÁTICO RELACIONADO AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO 72
5.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA RELACIONADA AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....76
6 CONCLUSÕES.....80
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 82
REFERÊNCIAS.....83

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade se tornou uma chance de redução de custos e diminuição do passivo ambiental de cidades, regiões e países; (CORTESE et al. 2017). A busca por soluções sustentáveis na construção civil tem se intensificado cada vez mais. Utilizar materiais que beneficiem aos usuários e ao meio ambiente é fundamental nos dias de hoje, para diminuição do uso constante de recursos e energias não renováveis (LAMBERTS *et al.*,2014). O tijolo ecológico possui características essenciais para seguir o modelo de desenvolvimento sustentável, quando em seu processo fabril pode-se utilizar o solo ou até reutilizar resíduos derivados da construção, ou ainda, o resíduo do próprio material, tornado o tijolo um material de boa qualidade e autossustentável (GONÇALVES & CARDOSO, 2016).

Sobre o tijolo ecológico a fabricação do produto busca técnicas ecologicamente corretas, favorecendo sua aplicação na construção civil que beneficia reutilização dos mais diversos tipos de materiais que seriam descartados de forma irregular, esses resíduos se tornam importantes para compor a base da fabricação do tijolo ecológico que além de favorecer a parte ecológica diminui o custo da edificação, é de suma importância ir em busca de alternativas que possam aliar praticidade na execução de uma edificação, onde a escolha dos materiais e dos métodos de como serão executados são determinantes para atingir uma economia significativa na obra (MORAIS et al., 2014).

Conforme Santana et al., (2013) ao analisarmos a quantidade de tijolos necessários para a construção de uma área de 60 m², estima-se 1500 unidades para o tijolo convencional e 3420 de tijolos ecológicos. É importante salientar que a cada 1000 tijolos ecológicos produzidos o equivalente a 2,5 m³ de entulhos da construção civil podem ser reincorporados no processo produtivo, para a fabricação de tijolos, o que equivale a 150 m³ retirados ao mês de entulhos do meio ambiente, a utilização de resíduos sólidos da construção civil como agregado na composição do solo-cimento é eficaz quando se fala em sustentabilidade, pois evita a destinação incorreta dos resíduos e reintegra-os ao processo produtivo.

O tijolo ecológico é o mais completo quando se fala em benefícios, pois possibilita a redução do tempo de construção em 30% em relação à alvenaria convencional, distribuem melhor a carga de peso sobre as paredes devido aos seus encaixes e colunas embutidas nos próprios furos, reduz o consumo de madeiras para

formas nas construções, proporciona uma economia de concreto e argamassa em cerca de 70% e de aço 50% em relação à estrutura de concreto armado (MOTTA et al., 2014).

A ferramenta mais usada na construção civil é o mapeamento de fluxo de valor que é a elaboração de um “mapa” que mostra todo o fluxo de materiais e/ou informações, tendo início na distribuição de suprimentos pelos fornecedores, passando pela empresa e finalizando no cliente. Pela análise do mapa de fluxo de valor identificam-se atrasos no processo produtivo, entendendo quais são as etapas que agregam ou retiram valor do produto. Desse modo, melhorias podem ser estudadas e propostas, sendo possível a aplicação de ferramentas para redução de desperdícios e aumento da eficiência produtiva (ROTHER & SHOOK,2000).

Durante o desenvolvimento da pesquisa, apresentou-se ferramentas e técnicas a serem incorporadas ao sistema com objetivo de otimizar a produção e aumentar a qualidade do tijolo. Para entender a proposta dessa pesquisa deve-se apresentar os resultados obtidos através de formulações dos traços para produção do tijolo ecológico analisando a qualidade das matérias-primas utilizadas, juntamente com o processo de cura x resistência encontrados em cada traço de forma a aperfeiçoar a qualidade do produto, tanto para manter o tijolo ecológico no mercado quanto para torná-lo um produto competitivo frente a outros estados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem como objetivo geral otimizar o processo de produção do tijolo ecológico, propondo novas formulações no traço para produção, pressão de compactação e o tempo de cura adequado para se obter o aumento da produção e da qualidade do material produzido.

2.1.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar as matérias-primas com ensaios físicos, químicos e mineralógicos;
- Através dos ensaios preliminares de compactação e mecânicos dos corpos de prova, identificar as formulações ou a formulação que promovam melhorias nas suas propriedades físico-mecânicas;
- Aumentar a pressão de compactação para verificar as propriedades tecnológicas;
- Elaborar o modelo matemático de simulação relacionando o tempo de cura x resistência à flexão que otimize o método de produção;
- Analisar as melhorias propostas no modelo otimizado, bem como seus impactos no sistema produtivo;
- Definir e recomendar, para fins de fabricação de tijolos ecológico, a mistura cimento+argila+areia mais adequada em termos do teor dos componentes da mistura, resistência à flexão de três pontos e processo de cura.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. TIJOLO ECOLÓGICO

O tijolo solo-cimento é considerado como ecológico uma vez que sua fabricação não utiliza o processo de queima, desta forma elimina o uso de óleo combustível ou madeira. Isto evita a emissão de grandes poluentes atmosféricos causadores do efeito estufa no ambiente e o desmatamento (CARVALHO, 2019). Além disso, nas alvenarias construídas com os blocos de Solo-Cimento ou tijolo ecológico, as colunas são embutidas em seus furos, fazendo com que o peso das alvenarias seja distribuído sobre as paredes, gerando uma alvenaria estrutural mais segura. A utilização dos tijolos ecológicos também dispensa o uso de 100% de madeira para a confecção de colunas, além do fácil acabamento, da durabilidade e da limpeza da obra devido à ausência de entulho. (SAMPAIO *et al.,* 2017).

Seu assentamento é realizado através de encaixes sucessivos macho e fêmea de simples nivelamento e alinhamento, sendo recomendado para a união dos elementos construtivos argamassa de assentamento de piso e cola PVA, na proporção respectiva de 20/1 e podendo ser utilizado como alvenaria aparente, recebendo somente uma pintura de impermeabilização, ou ser revestido com reboco e texturas (ALROMA, 2018).

De acordo com Motta (2014), esse tijolo possui dois furos, e isso aumenta o isolamento termo acústico, pois os furos compõem câmaras de ar no âmago das alvenarias. E, em relação ao tijolo convencional, ele também é mais resistente, impermeável e durável.

Fraga, *et al*. (2016) relatam que o uso do tijolo modular de solo-cimento proporciona um assentamento rápido e prático, evitando desperdícios de material além de proporcionar uma execução com uma mão de obra não especializada, gerando uma economia final da obra. A utilização do tijolo de solo-cimento possui diversas vantagens dentre as principais, a economia de até 50% do custo final da obra em relação aos blocos convencionais de cerâmica, a diminuição de até 30% do tempo final da construção e a economia de até 100% da utilização de argamassa de assentamento e também dispensa o uso de 100% de madeira para a confecção de colunas, além do fácil acabamento, da durabilidade e da limpeza da obra devido à ausência de entulho (SAMPAIO & NUNES,2017). O custo individual do bloco modular

de solo-cimento é mais elevado em relação ao tijolo cerâmico convencional. Mas, após o processo de aplicação do material na construção, de acordo com a técnica empregada, o valor total do serviço finalizadopode ter uma redução de até 40% do valor finalizado em relação ao tijolo convencional(SAMPAIO e NUNES, 2017).

A compra do milheiro do tijolo modular de solo-cimento fica em média, R$ 900,00 e o milheiro do tijolo cerâmico convencional, é em média de R$ 550,00, com isso,conhecendo o processo de fabricação e aplicação do tijolo ecológico e levando-se em conta suas vantagens geradas pelo seu uso, principalmente pela exclusão de outros materiais o tijolo solo-cimento se torna uma construção mais viável economicamente e ecologicamente (SAMPAIO e NUNES, 2017).

De acordo com Pisani (2005), pode-se acrescentar que, o tijolo de solo cimento possui matéria-prima abundante em todo o planeta por se tratar da terra crua. A NBR 10833:2012, que trata da fabricação de tijolo de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento, recomenda-se os valores apresentados na tabela 1, para as principais características que o solo deve possuir (ABNT, 2012).

Tabela 1- Especificação do solo para produção do tijolo ecológico- NBR 10832/13

Características	Condições
% do solo que passa na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4)	100%
% do solo que passa na peneira ABNT 0,075mm (nº 200)	10 a 50%
Limite de liquidez	≤ 45%
Índice de plasticidade	≤ 18%

Fonte: Adaptado de NBR 10832 (1989/2013).

Vale ressaltar, que de acordo com Ferraz e Segantini (2004), na falta de um solo capaz de suprir as necessidades impostas pelas normas técnicas, deve-se considerar a possibilidade de misturar dois ou mais solos no intuito de reduzir o consumo de cimento.

O solo-cimento teve grande aceitação no mercado, passando a ser utilizado em uma enorme variedade de construções, como na pavimentação de estradas e pátios industriais, na construção de aeroportos, no revestimento de barragens de terra e canais de irrigação, bem como na fabricação de tijolos, além de diversas outras aplicações (SEGANTINI, 2000). As figuras 1 a 4 mostram algumas casas construídas

com tijolos ecológicos.

Figuras 1 casa construída com tijolos ecológicos

Fonte: (Walter Nunes -construtor- 2021)

O mercado brasileiro possui diversos modelos de tijolos de solo-cimento, como mostra o Quadro 1, e podem ser especificados de acordo com a aplicação. Estes são escolhidos de acordo com o projeto, mão de obra, materiais, equipamento, locais, além de outras condicionantes específicas (PISANI, 2005).

Quadro 1. Tipos de tijolo ecológico produzidos e comercializados.

Tipo	Dimensões	Características
Maciço comum	5×10×20 cm. 5×10×21 cm.	Assentamento com consumo de argamassa similar dos tijolos maciços comuns.
Tijolo Maciço com encaixes	5×10×21 cm. 5×11×23 cm.	Assentamento com encaixes com baixo consumo de argamassa.
½ Tijolo com encaixes	5×10×10,5 cm. 5×11×11,5 cm.	Elemento produzido para que não haja quebras na formação dos aparelhos com juntas desencontradas.
Tijolos com dois furos e encaixes	5×10×20 cm. 6,25×12, 5×25 cm. 7,5×15×15 cm.	Assentamento a seco, com cola branca ou argamassa bem plástica. Tubulações passam pelos furos verticais.
½ tijolo com furo e encaixe	5×10×10 cm. 6,25×12,5×12,5 cm. 7,5×15×15 cm.	Elemento produzido para acertar os aparelhos, sem a necessidade de quebras.
Canelet as	5×10×20 cm. 6,25×12, 5×25 cm. 7,5×15×30 cm.	Elemento empregado para execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagens de tubulações horizontais.

Fonte: Extraído de PISANI, 2005.

A produção do tijolo ecológico no Brasil está em ascensão, porém no estado do Piauí é pouco conhecido e produzido, sendo que sua manufatura é feita de forma artesanal com a utilização de uma prensa manual e como matérias-primas básicas: a argila, o cimento e a água, a produção é feita basicamente em cooperativas de pequenas comunidades. Este produto pouco difundido vem aos poucos conquistando espaço no mercado consumidor do Estado (SOARES, SOARES & LIMA, 2016).

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS

3.2.1 Argila

A definição de argila se dá em vários campos de estudo; historicamente em mineralogia ela é um material natural, de granulação fina (menor que 2 μm) e que apresenta certa plasticidade em contato com a água. Conforme pesquisas de Figueiredo (2010), quantidades enormes de argilas são encontradas em solos brasileiros; desta forma, não é necessária a importação para a produção de materiais oriundos desta matéria-prima.

As argilas são provenientes da decomposição, durante milhões de anos, das rochas feldspáticas, muito abundantes na crosta terrestre. As argilas depositaram-se no fundo dos mares e lagoas e hoje se constituem em jazidas espalhadas pela natureza. Classificam-se, de acordo com sua geologia, em primárias ou residuais e secundárias ou sedimentares (SOARES, LINHARES & OLIVEIRA, 2014).

A argila é a principal e às vezes a única matéria-prima utilizada na produção da cerâmica estrutural, como é o caso das cerâmicas fabricadas no Piauí. Porém, se utiliza argilas com características distintas, que quando combinadas dão ao produto as propriedades estéticas e tecnológicas desejadas. No Piauí, encontram-se grandes jazidas de argilas com qualidade para utilização na cerâmica vermelha, com predominância do tipo caulinítica-ilítica de forma segmentada (SOARES, LINHARES & OLIVEIRA, 2014).

3.2.2 Cimento

Cimento é um tipo de aglomerante obtido a partir da mistura (denominada clínquer) entre o pó de calcário e argilominerais que, ao reagirem com água, formam uma pasta gelatinosa que endurece e fica rígida após secagem simples. Para melhorar a qualidade do produto, o cimento pode conter também algumas pequenas quantidades de outros materiais aglomerantes como a cal e o gesso. No Brasil, e no mundo, o cimento mais comercializado é tipo Portland, uma patente criada por um construtor britânico que descobriu que o sólido gerado após o endurecimento do cimento possui propriedades semelhantes com as rochas que ocorrem na ilha britânica de Portland (HAGEMANN, 2011).

De acordo com Souza et al. (2008), o cimento Portland composto de pozolana

(CP II Z-32), apresenta propriedades aceitáveis para a fabricação do solo-cimento, além da facilidade de obtenção do material devido ao alto índice de utilização no mercado da construção, correspondendo a aproximadamente 75% da produção industrial. O cimento é um dos integrantes na fabricação de tijolos ecológicos, por isso torna-se importante verificar o teor necessário para incorporação no solo junto com a água, uma vez que a resistência mecânica é influenciada pela quantidade de cimento (SÁ, 2019).

3.2.3 Areia

A areia é um material de origem mineral finamente dividido em grânulos, composta basicamente de dióxido de silício, forma-se por fragmentação das rochas por erosão, pela ação do vento ou da água. O tamanho dos grãos de areia (agregado miúdo) tem importância nas características dos materiais que a utilizam como componente, como é o caso da construção civil. Segundo BAUER (2015) o agregado é formado por mistura de grãos de extensa gama de tamanhos. É difícil encontrar uniformidade nas dimensões de grãos de areia de mesma categoria, a proporção relativa, em porcentagem, dos diferentes tamanhos de grãos que constituem o agregado é chamado de granulometria, esta composição é obtida através de ensaio laboratorial (RIBEIRO, PINTO & STARLING - 2013). A distribuição granulométrica da areia apresenta características mais convenientes para a fabricação de tijolos, pois proporciona uma melhoria na densidade de prensagem da mistura, afetando as propriedades finais do produto. Isso ocorre devido à composição da areia ser um material resistente e inerte, com função apenas de enchimento, favorecendo a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar com grãos menores do solo (SÁ, 2019).

Na região de Teresina-PI a extração de areia é realizada no leito do rio Poti. É importante ressaltar que a atividade de dragagem em Teresina, não está restrita ao rio Poti, mas estende-se também ao rio Parnaíba. É importante ressaltar que a atividade de dragagem em Teresina, não está restrita ao rio Poti, mas estende-se também ao rio Parnaíba (DIAS, 2006). Além de Teresina, existe a dragagem de areia para a construção civil em outros municípios do Piauí, como é o caso de Floriano, que tem aumentado muito nos últimos anos a atividade de dragagem, abastecendo o setor da construção civil na região sul do Estado do Piauí. Depois, a areia é secada

naturalmente pelo sol, selecionada em fina, média e grossa ou pelo sistema de peneiras ou pela deposição natural, conhecida como “saia da caixa”. Em seguida, a areia é comercializada, e passa para a última etapa, em que é feito o carregamento dos caminhões e transporte para as construções da cidade (DIAS, 2006).

3.3 OTIMIZAÇÃO

De acordo com Tondolo *et al.,* (2016) o processo de globalização faz com que as empresas sejam impactadas pela competição acirrada do mercado. Na disputa para se destacarem em um mercado competitivo, as indústrias buscam um meio de desenvolver vantagens competitivas. A implementação das técnicas de melhoria contínua, possibilitam grandes mudanças com poucos investimentos, o que gera a diminuição de desperdícios do sistema produtivo, redução de custos desnecessários e proporciona maior satisfação aos clientes.

A otimização de processos requer o desenvolvimento e emprego simultâneo de um conjunto de atividades que basicamente envolvem: a modelagem matemática, construção de funções objetivas e suas restrições e a escolha e adequação de algoritmo e tratamento numérico a ser empregado, dependendo das finalidades da otimização (SLACK *et al.*,2009).

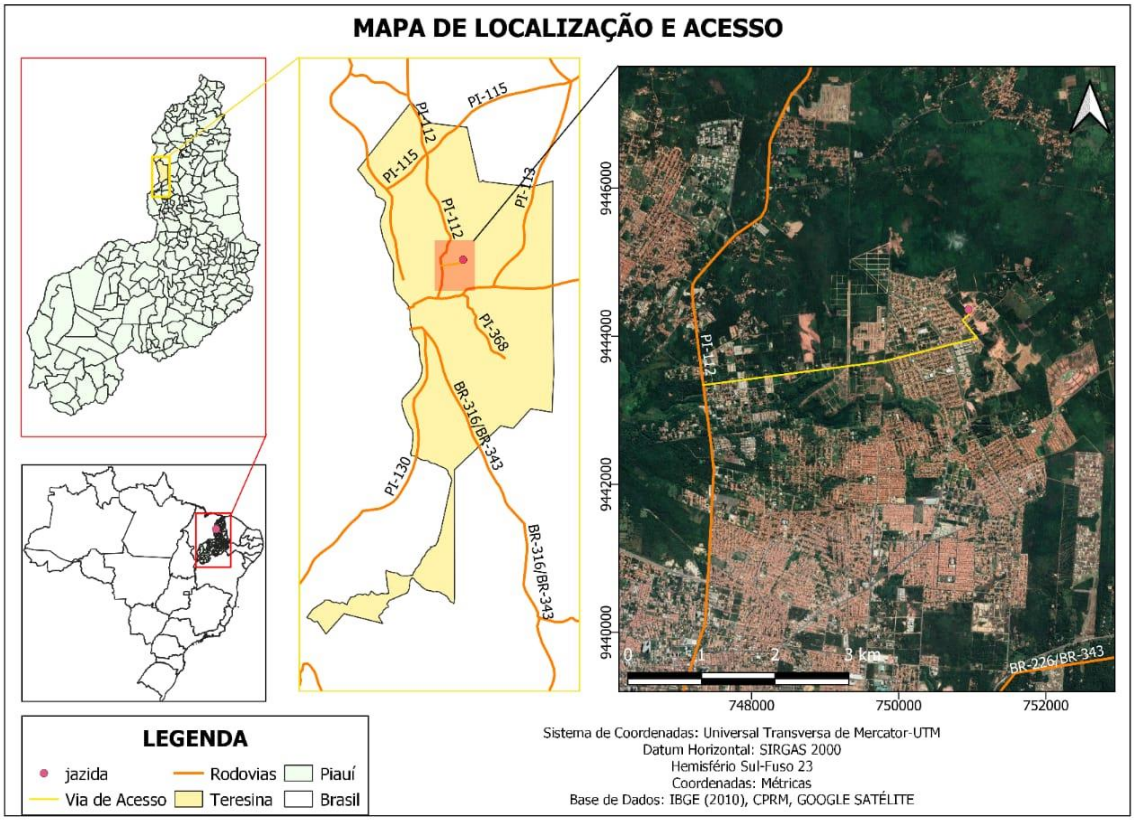
No geral, otimizar significa submeter um processo a um determinado modelo ou método. Buscando normatizar e organizar processos de trabalho a fim de aumentar a produtividade e efetivar os lucros, fazendo com que o produto atenda às expectativas da maneira mais simples, com menor custo e com menor variação (MARQUES, 2013). Meira (2003) afirma que, para se estabelecer um ambiente propício para a melhoria da qualidade, é indispensável o uso de ferramentas que permitam organizar os fatos e dados, transformando-os em informações disponíveis.

De acordo com Ferreira, Araújo e Gasparini (2016), as empresas que conseguem reduzir seus custos, por meio da implantação de sistemas eficientes no processo produtivo, sem reduzir a qualidade do produto ou serviço, destacam-se no mercado, gerando competitividade diante de seus concorrentes e, assim, conseguem aliar produtos de qualidade a preços baixos.

4 METODOLOGIA

A metodologia aqui descrita aborda desde a preparação das amostras de solo e a caracterização do mesmo, até a execução de ensaios destrutivos e não-destrutivos nos corpos de prova confeccionados com estes solos. O tipo de método para a caracterização dos solos tende a proporcionar uma melhor qualidade ao material em estudo. As amostras de areias de construção advindas do rio Poti e a argila coletada na jazida da Serra do Gavião (figura 2) ambas localizadas em Teresina-PI, a escolha do local para coleta do material deve-se ao fato desses materiais serem utilizados pelos oleiros da associação na produção do tijolo ecológico. Os materiais (argila e areia) foram ensaiados nos laboratórios: Materiais e Concreto da AESPI e Laboratório de Cerâmica – PPGEM-IFPI. Foi utilizado o cimento Portland CP II-Z-32, cujas características físicas, químicas e mecânicas atenderam aos requisitos da norma NBR 11578 (ABNT, 2018). A escolha do cimento CP II-Z-32 deveu-se a sua maior disponibilidade no comércio de materiais de construção, o cimento CP II-Z-32.

Figura 2 – localização da Jazida de argila da Serra do Gavião em Teresina-PI



Fonte: (Autor- 2020)

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Para caracterização do material coletado (argila), a avaliação qualitativa da qualidade da argila realizou-se de acordo com os ensaios sugeridos pelo Manual de construção com solo-cimento, CEPED (1999). Inicialmente a argila foi submetida aos seguintes ensaios: Ensaio da caixa – retração do solo, Ensaio da determinação da umidade ótima em campo (Hand test.), Ensaio da determinação da umidade ótima (teste da bola no solo), Ensaio do vidro, Ensaio do cordão, Ensaio da fita, Ensaio do bolo e Ensaio da resistência seca. A determinação dos limites de *Atterberg* para conhecer o limite de liquidez e o limite de plasticidade dos solos realizada apenas na argila obedecendo os preceitos das normas NBR 6459/16 e NBR 7180/16. Logo após os materiais (argila, areia fina e areia média – figura 3) passaram pelo ensaio de granulometria de acordo com a norma ABNT NBR 7181:2016, a fim de caracterizá-la quanto a distribuição e tamanhos das partículas sólidas, para completar a caracterização, os materiais coletados foram submetidos à análise química, através da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), e à análise mineralógica, através da técnica de Difratometria de Raios-X (DRX).

Figura 3 – Areia fina, Areia média e Argila

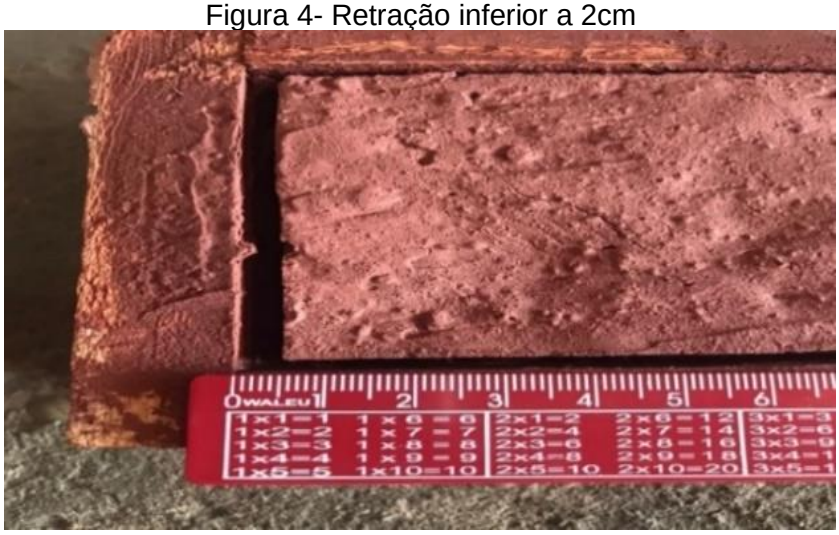
Fonte: (Autor- 2020)

4.1.1 Ensaio da caixa – retração do solo

Segundo CEPED (1999) & Taveira (1987) a água incorporada na mistura de solo-cimento evapora durante o processo de secagem e cura do material, gerando retração nas peças, além de propiciar poros e fissuras internas, provocando menor resistência mecânica. Para o ensaio de retração, o material foi inserido em uma caixa

de madeira, untada com óleo diesel, com dimensões de 60 cm comprimento; 8,5 cm de largura e 3,5 cm de espessura permanecendo em repouso à sombra por sete dias, após os sete dias a leitura da retração foi realizada no sentido do comprimento da caixa. Para que o solo possa ser utilizado na confecção de solo-cimento, a retração total deve ser inferior a 2 cm e a amostra não deve apresentar fenda transversal na parte central da caixa. Caso contrário, deverá ser adicionada areia até a obtenção do solo com as características desejadas. As figuras 4 e 5 apresentam etapas do ensaio da caixa.

Figura 4- Retração inferior a 2cm



Fonte: (Autor- 2020)

Figura 5 - Apresentação de trincas

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.2 Teste da determinação da umidade ótima em campo (hand test.)

Este ensaio consiste em tomar uma porção de solo umedecido nas mãos, apertando-o entre os dedos de forma que fique a marca dos dedos (CEPED, 1999 &

Taveira 1987). Se a marca dos dedos ficar bem definida, a umidade é adequada (figuras 6 a) e b)). Caso a marca não ocorra ou se houver esfarelamento, significa que a umidade é insuficiente.

Figuras 6: a) Argila entre os dedos b) marca dos dedos bem definida

Fonte: (Autor- 2020) Fonte: (Autor- 2020)

4.1.3 Ensaio da determinação da umidade ótima (teste da bola no solo)

Tome uma porção de solo umedecido nas mãos prensando-o até fazer uma bola com ele. Em seguida deixe a bola de massa cair de uma altura de aproximadamente 1,0 m em um chão firme (figura 7). Ao chocar-se com qualquer superfície dura, o bolo deverá esfarelar indicando assim um teor de umidade adequado (CEPED, 1999 & Taveira 1987).

Figura 7 - Bola a 1m de altura

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.4 Ensaio do vidro

O ensaio consiste em tomar um frasco de boca larga. Colocar a amostra de solo até a metade do vidro. Adicionar duas colheres de chá de sal e completar com água. Tampar o vidro, aplicando-o vigorosamente. Deixá-lo em repouso por aproximadamente meia hora (CEPED, 1999 & Taveira 1987). Após meia hora ocorre a decantação e observa-se as frações nitidamente diferenciadas no vidro (figura 8). O solo é considerado bom quando a quantidade de argila é igual a quantidade de areia. Caso a quantidade de areia seja maior que a de argila, o solo é melhor ainda. Se ocorrer de o solo possuir mais argila que areia, deve-se proceder uma correção no solo.

Figura 8 – Ensaio do vidro

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.5 Ensaio do cordão

Pegue uma porção de solo seco e junte água rolando cordões até que os mesmos comecem a se quebrar com um diâmetro de 3 mm. Com cordões quebrados, formar uma bola mantendo essa umidade. Esmagar a bola entre o polegar e o indicador (figura 9) verificando a força necessária para esmagá-la (CEPED, 1999 & Taveira 1987).

- Cordão duro: Só pode quebrar a bola com muito esforço.
- Cordão mole: A bola se fissura ou esmigalha com pouco esforço.
- Cordão frágil: não é possível reconstituir a bola sem que ela se fissure ou esmigalhe.

Figura 9 - Bola esmagada

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.6 Ensaio da fita

Tome uma porção de solo, com a mesma umidade do ensaio do cordão, e faça um cilindro de tamanho de 10 cm. Amassar este cilindro até formar uma fita, com 3 a 6 mm de espessura (figura 10) e com maior comprimento possível (CEPED, 1999 & Taveira 1987).

Figura 10 - Cordão com 5mm

Fonte: (Autor- 2020)

- Fita longa: 25 a 30 cm sem dificuldade
- Fita curta: 5 a 10 cm com dificuldade

4.1.7 Ensaio do bolo

Tome uma porção de solo bastante úmida e coloque na palma da mão de modo que uma película de água aflore na superfície da amostra (figura 11). Dando-lhe um aspecto liso e brilhante. Pressionar então o bolo com os dedos (CEPED, 1999 &

Taveira 1987).

- Reação rápida: Bastam 5 a 10 golpes para que a água aflore à superfície da amostra, sendo que a pressão dos dedos faz a água desaparecer imediatamente e uma pressão mais forte esmigalhe o bolo.
- Reação lenta: São necessários 20 a 30 golpes para que a água aflore: a pressão dos dedos faz com que o bolo se deforme como uma bola de borracha.

Figura 11- Bolo antes de ser golpeado

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.8 Ensaio da resistência seca

Faça duas ou três pastilhas de solo bem úmido, com cerca de 1cm de espessura e 2 a 3 cm de diâmetro (figura 12). Secar pastilhas ao sol por dois ou três dias. Após a secagem, tentar esmagar as pastilhas entre o indicador e o polegar (CEPED, 1999 & Taveira 1987).

- Grande resistência seca: É muito difícil esmagar a pastilha e quando se consegue está se quebra como um ‘biscoito’.
- Média resistência seca: Não é difícil partir a pastilha e com algum esforço consegue-se reduzir os pedaços a pó.

- Fraca resistência seca: É muito fácil partir a pastilha e ao partir-se reduz-se a pó.

Figura 12 – Pastilha após secagem

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.9 Limite de liquidez e Limite de plasticidade

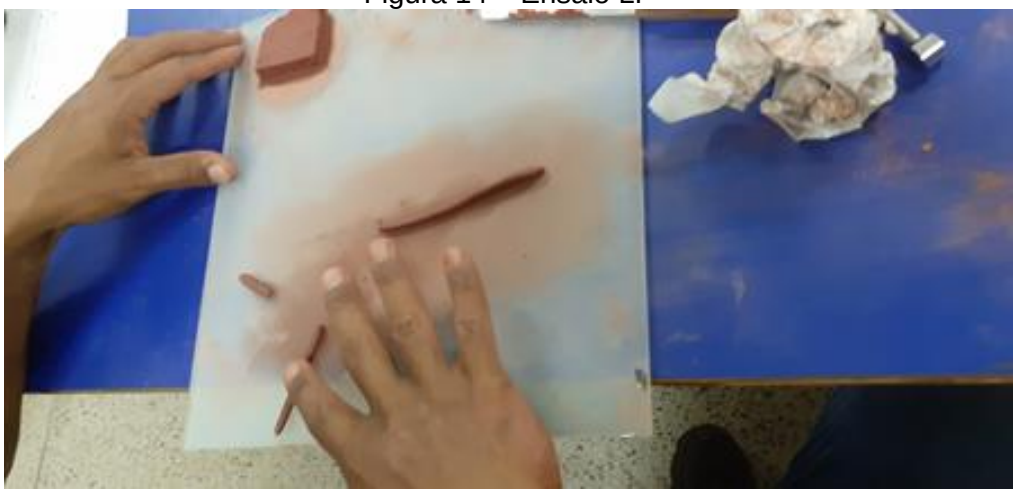
Continuando a caracterização da argila a determinação do Limite de Liquidez NBR 6459/16 e do Limite de Plasticidade NBR 7180/16 – esses dois ensaios caracterizam o solo quanto aos índices básicos representativos da plasticidade. A determinação do limite de liquidez (LL) é o teor de umidade necessária para o solo passar do estado plástico para o estado líquido através de uma técnica experimental aplicada em um aparelho Casagrande (Figura 13).

Figura 13 - Aparelho de Casagrande

Fonte: (Autor- 2020)

A definição de Limite de Plasticidade (LP) é determinada basicamente pelo cálculo da porcentagem de umidade onde o solo começa a se quebrar quando se tenta moldar (Figura 14), com ele, um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento (Caputo, 2008).

Figura 14 – Ensaio LP



Fonte: (Autor- 2020)

4.1.10 Granulometria das matérias-primas

O ensaio de composição granulométrica será realizado conforme a norma ABNT NBR 7181:2016, onde o mesmo consiste em separar os grãos das amostras (argila, areia fina e areia média) conforme o tamanho (Figura 15), através do peneiramento. Na primeira etapa do ensaio foi realizada a pesagem de 1kg das amostras a ser caracterizada e o encaixe das peneiras, encaixadas em ordem crescente de baixo para cima de acordo com a abertura da malha. As amostras passaram por agitação mecânica do conjunto, por 5 minutos, para permitir a separação e classificação dos diferentes tamanhos de grãos das amostras. Será calculada a porcentagem retida em cada peneira. Para a determinação do Módulo de finura, serão somadas as porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras de série normal e dividida por 100. Para tal definição será considerada a utilização de peneiras de séries normal e intermediária. O ensaio realizou-se nas três amostras dos materiais em questão, onde elaborou-se um quadro resumo da composição granulométrica do material de cada uma das amostras.

Figura 15 – Ensaio de granulometria

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.11 FRX - Ensaio de fluorescência de raios- x

Este ensaio é baseado na energia da radiação de fluorescência emitida por um material após sua excitação com Raios-X, tornando possível identificar os elementos químicos presentes. A utilização da técnica de fluorescência de Raios-X - FRX permite uma rápida avaliação qualitativa dos constituintes da matriz. Para este trabalho as amostras coletadas (argila, areia fina e areia média) foram peneiradas na peneira Nº 200 e encaminhadas ao Laboratório de Materiais (LABMAT) no IFPI para ser submetida a uma análise química (Figura 16) através da técnica de espectrometria de fluorescência de Raios-X por meio de um equipamento da marca Shimadzu de modelo EDX-700.

Figura 16 – Preparação para ensaio de FRX

Fonte: (Autor- 2020)

4.1.12 DRX - Ensaio de difração de raios-x

A Difratometria de Raios-X (DRX) consiste em uma técnica analítica de caracterização química e estrutural de minerais bastante aplicadas na análise de solos. É o procedimento de laboratório mais comum para determinação da composição mineralógica de solos, principalmente na fração argila. A aplicação desse ensaio é fundamental para identificação e caracterização dos compostos cristalinos presentes nos solos (Resende et al., 2005). As análises da difratometria de Raios-X (DRX) foram realizadas no laboratório de Ciências e Engenharia dos Materiais da UFPI e as amostras foram utilizadas em forma de pó.

4.2 FORMULAÇÕES PROPOSTAS

De acordo com Pecoriello e Barros (2004), para os blocos a dosagem dos elementos da mistura pode haver uma variação na proporção em volume de 1:10 a 1:14 (cimento: solo), ao que se deve escolher o melhor traço, dentro dessa faixa. Em geral, o traço referência para a fabricação de tijolos de solo cimento é o 1:10, sendo uma de cimento e dez partes de solo. O traço 1:7, rico em cimento e o 1:14 pobre em cimento.

Para esta pesquisa foram produzidos no laboratório de cerâmica do PPGEM 04 traços com as diferentes formulações apresentadas na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Formulações utilizadas

Amostras	cimento	argila	Areia
F1	1	3	7
F2	1	5	5
F3	1	4	6
F4	1	5	5

Fonte: (Autor- 2020)

Utilizou-se o traço 1:3:7 e o traço 1:4:6 usado por Mendes *et al*., (2014) em seus estudos sobre a produção do tijolo ecológico, e o traço 1:5:5 foi um traço a ser testado neste trabalho. O traço 1:3:7 é também utilizado pelos oleiros da associação teresinense de tijolo ecológico.

4.3 PROCESSO DE PREPARAÇÃO DA MISTURA

A mistura com cimento + argila + areia para cada uma das formulações são feitas manualmente (figura 17) até atingir uma coloração uniforme. A quantidade da

água adicionou-se à mistura até ser suficiente para hidratar o cimento e proporcionar boa compactação. Primeiramente, o solo foi peneirado manualmente e destorroado. Posteriormente, com a ajuda de uma balança digital com precisão de 1kg, mediu-se em peso os materiais a serem utilizados para a confecção de cada corpo de prova.

Figura 17 – Preparação da mistura

Fonte: (Autor- 2020)

4.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a preparação da mistura, esta foi transferida ao local de prensagem. O material foi compactado, fazendo com que o corpo de prova se molde por meio da prensa em formato retangular em um total de 250 corpos de prova para ensaios. As peças produzidas pelo molde (figura 18) foram retiradas da máquina, onde os corpos de prova foram recolhidos e prontos para iniciar o processo de cura. Os corpos de prova são confeccionados por meio de uma fôrma de aço retangular (10x10x80 – largura x espessura x comprimento, mm), preenchido com o material, aproximadamente 20 gramas e com umidade de 9,4%, prensadas hidraulicamente sob 50MPa de carga axial por 2 minutos.

Figura 18 - Moldagem dos corpos de prova

Fonte: (Autor- 2020)

4.5 PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO

Segundo Pecoriello e Barros (2004), a compactação é um fator determinante nos tijolos solo-cimento, pois, se faz necessário manter pressões constantes e adequadas, tornando um produto de boa qualidade com uma produção regular dos tijolos, e garante a boa aparência da parede ((SOUZA, PEREIRA, 2006 & SILVA, 2005).

Barbosa e Mattone (2002) afirmam que compactação com baixas pressões carecem de maior quantidade de cimento para atender a resistência necessária, já que quanto maior a compactação na prensa, mais resistente se torna o tijolo, devido à inovação tecnológica, que possibilitou dessa maneira o aprimoramento de antigas técnicas de construção em terra.

O tipo de prensa é importante, pois, quanto maior a compactação imposta ao solo, melhor será o desempenho final do tijolo. No mercado encontram-se diversos tipos de prensas, manuais e hidráulicas. Estas últimas imprimem ao solo, pressões muito maiores que as manuais, resultando em produtos muito resistentes (BARBOSA, 2003).

Considerada uma quantidade escalar, a pressão varia de acordo com a região de contato, ou seja, quanto menor a área pressionada, maior será a pressão exercida. Essa força, quando se colide com um objeto, expande-se para as extremidades do mesmo (JEWETT JR, SERWAY, 2010).

A compactação da argila é definida como o método de aumentar mecanicamente a densidade através da união de suas partículas e dos seus

componentes. Na prensa do laboratório PPGEM (figura 19), os corpos de prova foram moldados com uma pressão de 50 MPa. Foi calculada também a pressão exercida sobre tijolo ecológico produzido na prensa hidráulica Eco brava (figura 20) usada na olaria que equivale a 25 MPa. Então, a pressão aplicada nos corpos de prova prensados no laboratório PPGEM é o dobro da pressão aplicada no processo de moldagem dos tijolos ecológicos. Este critério foi adotado como parâmetro a ser avaliado nesta pesquisa na busca da otimização da qualidade do produto final.

Figura 19 - Prensa hidráulica-IFPI

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 20 - Prensa hidráulica - Olaria

Fonte: (Autor- 2020)

4.6 PROCESSO DE CURA

A cura do Tijolo Ecológico é um procedimento que visa melhorar o seu processo de endurecimento deixando-o mais resistente e firme. O objetivo é retardar a evaporação da água usada no preparo da mistura, garantindo a completa hidratação do cimento e as reações químicas necessárias entre todos os componentes. Ainda de acordo com a ABNT NBR 10833/2012, após a moldagem (figura 21) e durante os sete primeiros dias, os tijolos devem ser umedecidos, a fim de garantir a cura necessária. E os tijolos, podem ser utilizados após 14 dias de sua fabricação. Os corpos de prova produzidos nos três primeiros dias de cura foram pulverizados com água, duas a quatro vezes por dia. De acordo com Pisani (2015), a cada dia a mais de cura, o tijolo

apresenta resistência maior, sendo que após vinte e oito dias a cura está completa e o bloco apresenta aproximadamente 95% da sua resistência de cálculo, sendo esse o prazo ideal para transporte e utilização. Após o processo de cura ser concluído, o processo de fabricação é encerrado. Para este trabalho foi observado o tempo de cura até os 56 dias que de acordo com Ferreira (2003) estudou a resistência do tijolo ecológico analisando um maior período de cura apresentou resultados significativos, verificando sua influência no resultado da resistência dos corpos de prova.

Figura 21 - Início do processo de cura

Fonte: (Autor- 2020)

4.7 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água é o valor em porcentagem da massa de água absorvida pelo corpo. Para este ensaio de cada amostra foram preparados 3 corpos de prova de cada formulação depois do período de cura, foram submersos em água destilada por 24 horas. Após esse tempo, foram removidos e retirados excesso de água superficial com um pano umedecido e em seguida pesados em balança para determinar o valor de água que cada corpo de prova absorveu. Os corpos de prova foram colocados em uma estufa a 110°C por 24h, e pesados novamente obtendo o peso seco (figura 22 a) e b)). As amostras ensaiadas devem apresentar a média dos valores de absorção igual ou menor que 20% e valores individuais iguais ou menores que 22%, aos 28 dias de idade de acordo com a norma NBR 8492:2012.

Figura 22: a) Peso úmido e b) peso seco

Fonte: (Autor- 2020) Fonte: (Autor- 2020)

O valor da absorção de água, em percentual, foi obtido através da equação 1, abaixo:

$$AA(\%) = \frac{Pu-Ps}{Ps}\ x\ 100 \qquad (1)$$

Sendo:

- AA = absorção de água em porcentagem
- Pu= massa do corpo de prova úmido (g)
- Ps= massa do corpo de prova seco (g)

Os resultados foram obtidos pela média aritmética de três valores em corpos-de prova distintos.

4.8 ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM

Este ensaio segue a NBR 13554 (ABNT, 2012) para tijolo ecológico e atribui a perda de massa como parâmetro indicativo da durabilidade do material. A norma recomenda a preparação de três corpos de prova, serão avaliadas a variação de volume no corpo 1 e a perda de massa nos corpos 2 e 3. Para a execução deste ensaio determinou-se o volume inicial do corpo de prova 1, além da massa e do volume do mesmo após todos os corpos de prova passarem pelo processo de cura durante sete dias. Os corpos de prova foram imersos em água durante cinco horas

(figura 23), logo após determinou-se novamente a massa e o volume do corpo 1 após a retirada do excesso superficial de água, em seguida os três corpos de prova foram colocados na estufa a uma temperatura de (71 ± 2) °C durante 42 horas e, mais uma vez, obteve-se a massa e o volume do primeiro corpo de prova. Para os corpos de prova 2 e 3 dias procedeu-se com uma escovação total e firme das superfícies dos mesmos, sendo 18 a 20 escovações verticais para a área lateral e quatro escovações para cada uma das bases. O tempo de retirada da estufa e realização das escovações foi de 1 hora.

O procedimento a partir da imersão dos corpos de prova em água durante cinco horas até a escovação dos mesmos dura de 48 horas, repetido por cinco vezes. Após os seis ciclos realizados, levam-se os corpos de prova para estufa com temperatura a 110°C.

Figura 23 – Corpos de prova imersos por 5h

Fonte: (Autor- 2020)

Para a obtenção da perda de massa nos outros dois corpos de prova, usa-se o cálculo da quantidade relativa de água nos mesmos após atingirem massa constante calculado conforme a Equação 2:

$$A = \frac{m_{f(1)} - m_{i(1)}}{m_{i(1)}} \qquad (2)$$

- A: água retida no corpo de prova 1
- $m_{f\,(1)}$: a massa seca final do corpo de prova 1

- $m_{i\,(1)}$: a massa seca inicial do corpo de prova 1

Deve-se fazer a correção das massas secas dos corpos de prova, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e que ficou retida no primeiro corpo de prova a 110°C. Usa a Equação 3:

$$M_{fc(2,3)} = \frac{m_{f(2,3)}}{A+1} \qquad (3)$$

- $M_{fc(2,3)}$: é a massa seca final corrigida dos corpos de prova 2 e 3, em g;
- $m_{f\,(2,3)}$: é a massa seca final dos corpos de prova 2 e 3 após atingirem massa constante, em g;
- A: é a água retida no corpo de prova 1.

Finalmente, calcula-se a perda de massa dos corpos de prova 2 e 3 como porcentagem da massa seca inicial, conforme a Equação 4:

$$P_{m(2,3)} = \frac{m_{i(2,3)} - m_{fc(2,3)}}{m_{i(2,3)}} \qquad (4)$$

- $m_{i\,(2,3)}$: a massa seca inicial calculada por ocasião da a massa seca inicial calculada por ocasião da moldagem dos corpos de prova 2 e 3, em g;
- $m_{fc\,(2,3)}$: a massa seca final corrigida dos corpos de prova 2 e 3, em g;
- $P_{m\,(2,3)}$: a perda de massa dos corpos de prova 2 e 3, em %.

De acordo com a ABCP, a perda de massa dos tijolos de solo-cimento ou tijolo ecológico não deve ser superior a 10% após todos os ciclos de molhagem e secagem. Foram preparados três corpos de prova de cada formulação para este ensaio em cada uma das idades: aos 28 e aos 56 dias.

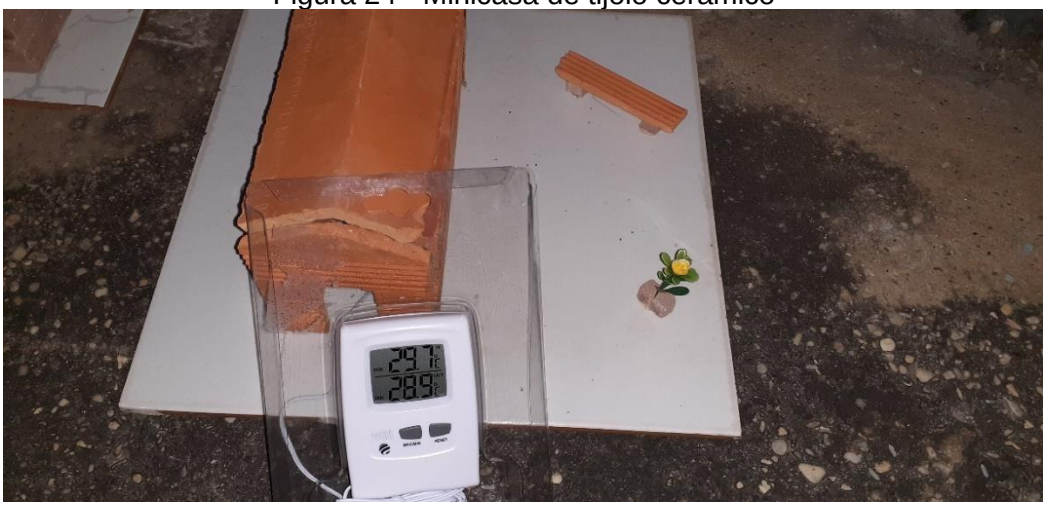
4.9 DESEMPENHO TÉRMICO

Para verificação da condutividade térmica dos blocos em solo-cimento, foram desenvolvidos cálculos normalizados de acordo com a norma a NBR 15220-2 (ABNT, 2005) para se encontrar os valores de transmitância térmica do material, e que possibilitaram sua verificação estimada quanto a eficiência do material. As minicasas modelo foram confeccionadas após os ensaios mecânicos dos corpos de prova. Posteriormente à construção dos modelos realizou-se o ensaio de aferição das

temperaturas internas e externas, com o auxílio de um termômetro digital que fez as medições de temperatura interna e externa, assim como as temperaturas máximas e mínimas.

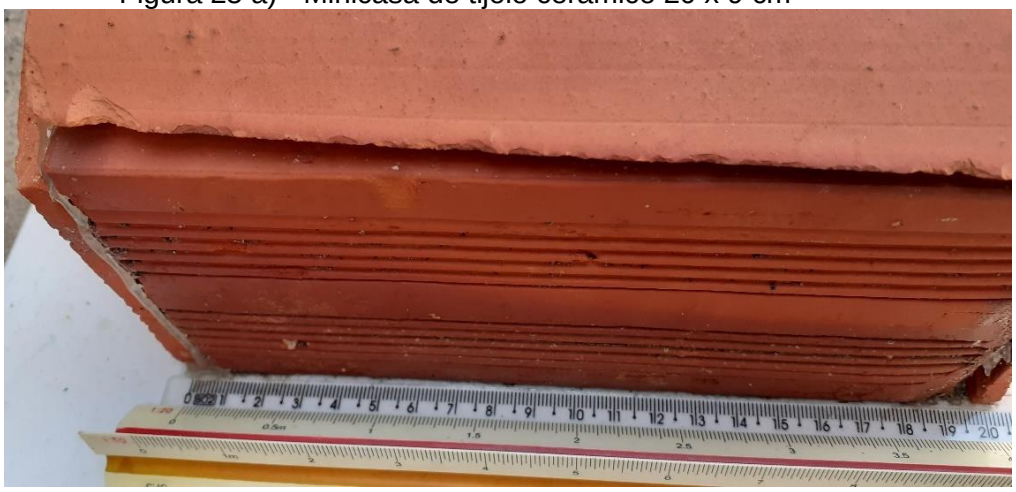
Os dois modelos de casas foram construídos em um espaço amplo e expostos ao sol em condições iguais para as duas minis casas, como base utilizou-se pedaços de cerâmica para simular o piso. Para a construção dos telhados foram utilizados pedaços de telhas cerâmicas cortadas sob medida com auxílio de uma makita Bosch, com as mesmas dimensões e características. Os pequenos modelos de edificações apresentam as mesmas medidas e mesmo posicionamento para evitar distorções nos resultados. A mini casa construída de tijolo cerâmico convencional (figuras 24 e 25) com medidas 20 cm x 9 cm, no escalímetro de 1:20 equivale a um cômodo de 4 m x 1,80m. Para a mini casa construída com bloco ecológico (80x10x10 mm) possui medidas 19 cm x 9 cm, no escalímetro de 1:20 é equivalente a um cômodo 3,80m x 1,80m (figuras 26 e 27). Os testes da variação de temperatura foram realizados nos três turnos do dia, correspondentes aos horários das 07:00h, 14:00 e 19:00h, durante três dias consecutivos.

Figura 24 - Minicasa de tijolo cerâmico



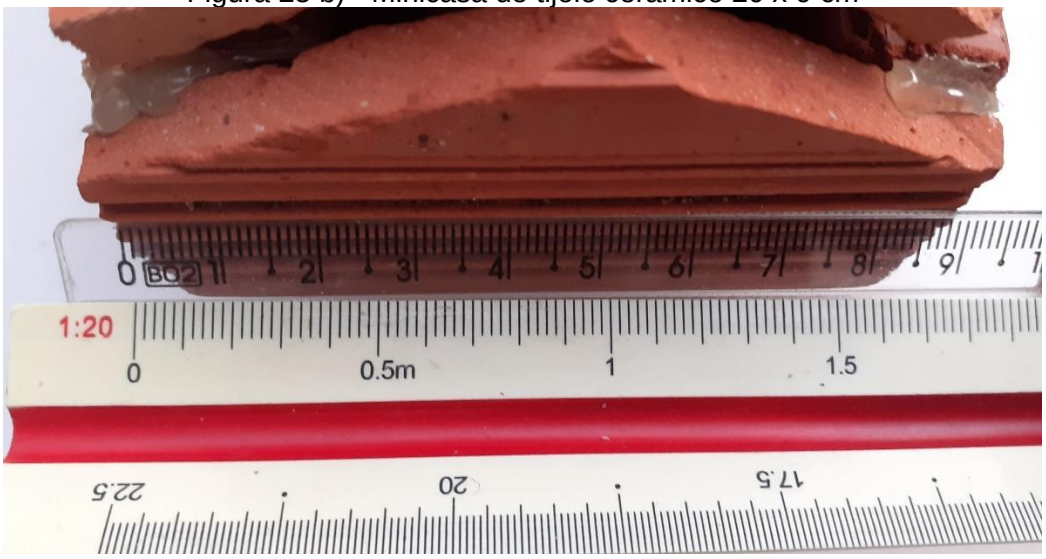
Fonte: (Autor- 2020)

Figura 25 a) - Minicasa de tijolo cerâmico 20 x 9 cm



Fonte: (Autor- 2020)

Figura 25 b) - Minicasa de tijolo cerâmico 20 x 9 cm



Fonte: (Autor- 2020)

Figura 26 - Minicasa de bloco ecológico

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 27 a) - Minicasa de bloco ecológico 19 x 9 cm

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 27 b) - Minicasa de bloco ecológico 19 x 9 cm

Fonte: (Autor- 2020)

4.10 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

A técnica de ensaio de resistência à flexão é caracterizada pela aplicação de uma carga crescente em pontos conhecidos de uma barra de geometria conhecida, geralmente está apoiada ou apresenta engastes nas suas extremidades. Pelo ensaio, são mensurados os valores de carga versus deformação, ou ainda a flecha (V), o deslocamento entre os pontos onde se aplicou a tensão. Este ensaio é aplicado comumente para os materiais cerâmicos, pois, é possível obter dados quantitativos da deformação sofrida durante flexão (ZARUR, 2018). Para a realização do ensaio de flexão utilizou-se máquina universal de ensaios Autograph AG-X 250KN, da fabricante Shimadzu com uma velocidade de ensaio de 500 N/s (500 kgf/s) do laboratório de mecânicado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM.

Foram utilizados 7 corpos de provas de cada formulação já definida neste trabalho sendo ensaiados com 7, 14, 28 e 56 dias, os corpos de prova foram posicionados, com uma distância entre apoios de 60 cm e a carga sendo progressivamente aplicada pelo cutelo até a ruptura. Após a realização do ensaio, os dados coletados passaram por uma análise estatística e um modelo matemático. Os ensaios de flexão (figura 28) podem ser executados de acordo com a norma ASTM-C99 (ABNT-NBR 12763), efetuado com três cutelos e designado “tração na flexão”. A formulação leva em conta somente os efeitos de flexão sobre o estado geral de tensões tem para uma viga de seção retangular, na forma da equação 5:

$$\delta_{Flex}^{3p} = \frac{3PL}{2bh^2} \qquad (5)$$

Onde P é a carga, L a distância entre cutelos, b a largura do corpo de prova e h a sua altura.

Figura 28 - Ensaio de flexão em andamento

Fonte: (Autor- 2020)

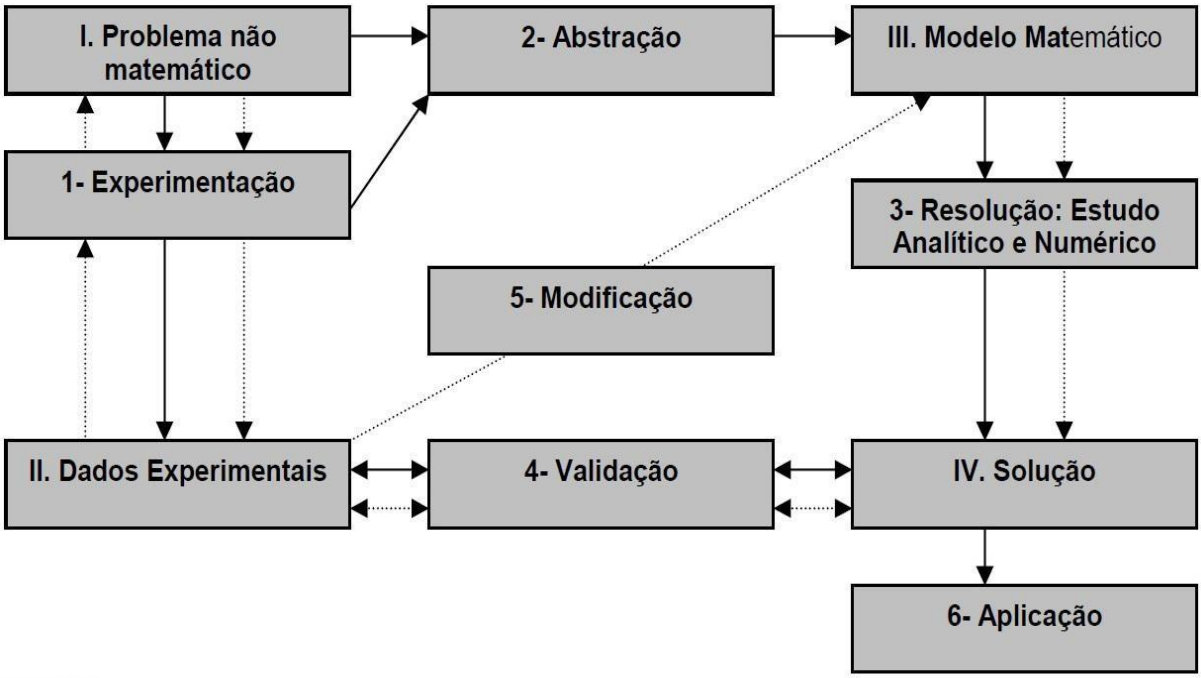
4.11 MODELO MATEMÁTICO RELACIONADO AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Modelo matemático é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam de alguma forma o objeto estudado. O modelo pode ser considerado como uma síntese de reflexão sobre alguma parte da realidade. Seu objetivo é explicar ou entender a situação estudada para, eventualmente, poder agir sobre ela e, mesmo as situações mais simples fornecem motivações para uma iniciação científica (BASSANEZI, 2012). De acordo com Bezerra (1994), existe uma forma matemática unificada para tratar muitas teorias científicas. Conceitualmente, um modelo matemático ou simplesmente modelo, pode ser apresentado como uma representação de um sistema real, o que significa que um modelo deve representar um sistema e a forma como ocorrem as modificações no mesmo.

A formulação de um modelo matemático envolve a escolha de variáveis mais importantes para o fenômeno em estudo e de leis consideradas obedecidas pelas variáveis escolhidas (SODRÉ, 2007).

Segundo Bassanezi, (2012) estas são as etapas (figura 29) do Modelo Matemático presentes no processo de modelagem.

Figura 29 – Etapas do modelo matemático



Fonte: Bassanezi (2012)

Etapas do modelo matemático relacionado ao tempo de cura e resistência à flexão:

1. Experimentação - Levantamento de dados;
2. Abstração - Levantamento de hipótese;
3. Resolução: Análises das equações dos gráficos;
4. Validação – Feita por intermédio dos resultados obtidos nesta pesquisa;
5. Modificação: Adequação dos dados;
6. Aplicação do Modelo – Apresentar um estudo da situação permitindo encontrar um resultado.

4.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA RELACIONADA AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os dados foram organizados em planilhas do Excel®, para realização de análise descritiva das variáveis observadas nos grupos estudados. Posteriormente, os dados foram exportados para o programa SPSS (for Windows® versão 20.0) para análise estatística dos resultados. Os testes realizados para comparação das médias das variáveis tempo de cura e resistência à flexão, entre as formulações adotadas,foi a análise de variância (ANOVA), considerando a distribuição paramétrica dos dados. Os testes Shapiro-Wilk, Kruskal-Wallis e o teste T Pareado foram utilizados para comparar as médias entre os diferentes tratamentos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 Caracterização da argila:

5.1.1.1 Ensaios Preliminares

Inicialmente a argila passou por ensaios preliminares propostos por Taveira (1987) e pelo CEPED (1999), são apenas de caráter qualitativo. Os resultados destes ensaios estão descritos nos quadros 2,3 e 4.

Quadro 2 – Resultados: Ensaio da caixa – retração do solo, Ensaio do vidro, Hand test. e Teste da bola no solo.

Ensaio da Caixa-Retração do solo	Ensaio do vidro	Ensaio da determinação da umidade ótima em campo (Hand test.)	Ensaio da determinação da umidade ótima (teste da bola no solo)
No caso da argila em estudo apresentou trincas após os 7 dias de secagem e a retração não ultrapassou os 2 cm, portanto este solo precisa ser corrigido com adição de areia	Resultado para este ensaio: Argila> Areia, portanto precisa ser corrigido com adição de areia.	Resultado do ensaio: A marca dos dedos ficou bem definida, significa que a umidade é adequada.	Resultado do ensaio: a bola ao chocar-se com o chão esfarelou, indicando que o teor de umidade do solo em estudo é adequado

Fonte: adaptado de CEPED,1999

Quadro 3 – Interpretação dos ensaios expedidos do solo

Ensaio do cordão	Ensaio da fita	Ensaio do bolo	Resistência seca	Tipo do solo	Possibilidade de utilização
Cordão frágil ou resistência nula	Fita curta ou não se consegue fazer a fita	Reação rápida a lenta, mas jamais muito lenta	Fraca a nula, geralmente nula	Areias finas, areias finas siltosas, areias finas argilosas, siltes argilosos	Solo prensado para tijolos, adobes com cimento, terra compactada com ou sem cimento: quando muito arenosos, juntar solos finos, siltes e argilas
Cordão frágil a semiduro	Fita curta	Reação lenta a muito lenta	Fraca a média	siltes	Utilização mais fácil que os solos anteriores, mas possível com uso de cimento
Cordão semiduro	Fitas curtas a longas	Reação muito lenta ou não tem reação	Média a grande	Argilas com pedregulhos, argilas com areia e argilas siltosas	Possível de usar apenas para a terra compactada ou tijolo prensado, com cimento
Cordão duro	Fita longa	Não tem reação	Grande	Argilosos	Não deve ser usado

Fonte: adaptado de CEPED,1999

Quadro 4 - Resultados dos ensaios: da fita, do cordão, do bolo e resistência seca aplicados na argila.

Ensaio do Cordão	Ensaio da fita	Ensaio do bolo	Resistência seca	Tipo do solo	Possibilidade de utilização
Cordão semiduro	Fitas curtas a longas	Reação muito lenta ou não tem reação	Média a grande	Argilas com areia e argilas siltosas	Possível de usar apenas para a terra compactada ou tijolo prensado, com cimento

Fonte: adaptado de CEPED,1999

5.1.1.2 Limite de liquidez e Limite de plasticidade (LL e LP)

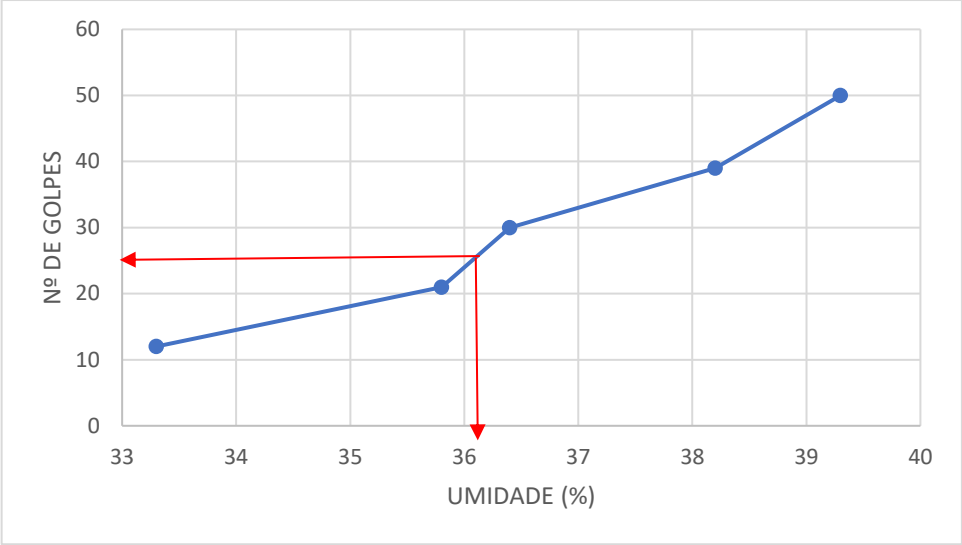
Na sequência os ensaios foram realizados conforme descrito na metodologia e seus respectivos resultados são apresentados aqui. Como pode ser observado no quadro 5 e na figura 30 pelo gráfico do limite de liquidez da argila corresponde a 36,6%, referente à umidade do vigésimo quinto golpe, a amostra de solo ficou dentro do limite recomendado que é igual ou inferior a 45%.

Quadro 5 - Determinação da umidade - LL

Pontos	Nº de Golpes	P.U (g)	P.S (g)	% Umidade
1º	50	8,96	8,08	39,3
2º	39	8,83	7,92	38,2
3º	30	8,71	7,92	36,4
4º	21	8,66	7,99	35,8
5º	12	8,28	7,71	33,3

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 30 – Gráfico com resultado - LL



Fonte: (Autor- 2020)

O limite de plasticidade foi determinado a partir de amostras de solo fino e seco, utilizando uma placa de vidro e um gabarito metálico para moldagens em cilindros de 3 a 4 mm de diâmetro. A determinação da plasticidade do solo foi decorrente da metodologia aplicada segundo a norma NBR 7180:2016. O limite de plasticidade (LP) é expresso pela média aritmética dos teores de umidade obtidos no ensaio, o resultado da amostra corresponde a 21,2% (quadro 6). Isso demonstra que o solo apresenta boa plasticidade por possuir uma quantidade suficiente de finos (argila + silte) para garantir à mistura a capacidade de ser moldado no momento da fabricação do tijolo ecológico.

Quadro 6 – Limite de Plasticidade

Cápsula Nº	01	06	08	09	10	
Peso Bruto Úmido (g)	8,33	8,16	8,74	8,72	8,89	LL 36,6%
Peso Bruto Seco (g)	8,17	8,02	8,55	8,55	8,72	
Peso da Cápsula	7,43	7,33	7,67	7,74	7,93	LP 21,2%
Peso da Água (g)	0,16	0,14	0,19	0,17	0,17	
Peso do Solo Seco (g)	0,74	0,69	0,88	0,81	0,79	IP 15,4
Umidade (%)	21,6	20,3	21,6	21,0	21,5	

Fonte: (Autor- 2020)

5.1.1.3 Índice de plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade é um dos índices utilizados para a caracterização de um solo argiloso ou com muita presença de finos. Matematicamente, ele pode ser definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, logo, temos: IP = LL- LP.

Quadro 7 – Condição Plástica da argila

Condição da argila	Faixa do índice de plasticidade
Não plástica	IP= 0
Fracamente plástica	1<IP<15
Mediamente plástica	7<IP<15
Altamente plástica	IP>15

Fonte: (Autor- 2020)

O índice de plasticidade deste ensaio é igual a 15,4%, classificando a argila como altamente plástica (quadro 7).

Argila é um componente primordial na composição do solo-cimento devido às suas propriedades aglomerantes, a resistência inicial, a melhora da trabalhabilidade. Porém, esse material quando apresenta índice de plasticidade altamente plástico pode ocasionar fissuras, trincas ou rachaduras depois de seca, em consequência de sua alta retração, bem como sua redução de resistência, esta condição corrobora com os ensaios preliminares da caixa – retração do solo e do vidro que indicam correção de areia para argila escolhida nesta pesquisa. Ainda de acordo com Silva (2005), solos mais granulares, tais como as areias, necessitam de maiores pressões de moldagem. Já solos mais finos, necessitam de pressões mais baixas. Desta forma, observa-se que a pressão proposta no ‘item’ 4.5 proporciona um aumento na resistência quando utilizados solos granulares.

5.1.2 Granulometria das matérias-primas

5.1.2.1 Granulometria da Argila

O ensaio de granulometria ABNT NBR 7181:2016 é de fundamental importância para compreender e associar os resultados obtidos neste trabalho ao tamanho de partícula da matéria-prima (argila) utilizada.

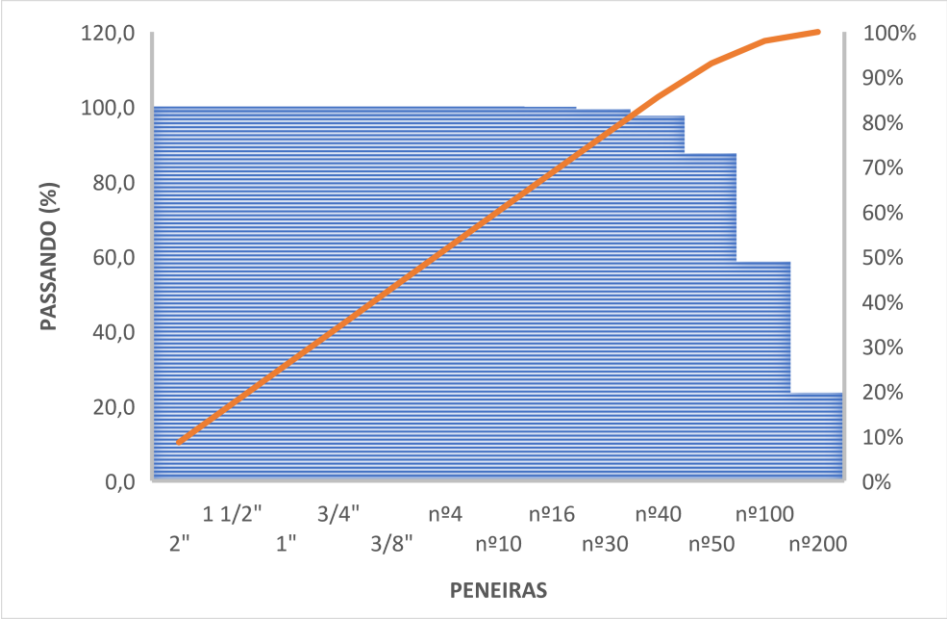
Nota-se no quadro 8 e figura 31 que representa o gráfico da curva granulométrica observa-se que o material que passa na peneira nº 4 (4,8 mm) corresponde a 100% do solo e o material que passa na peneira com abertura de malha de 0,075 mm, portanto, dentro do limite entre 10% e 50%.

Quadro 8 - Ensaio de granulometria da argila

Peneiras	Passando
2"	100,0
1 1/2"	100,0
1"	100,0
3/4"	100,0
3/8"	100,0
nº4	100,0
nº10	100,0
nº 16	99,9
nº 30	99,3
nº 40	97,5
nº 50	87,5
nº 100	58,6
nº 200	23,6

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 31 - Gráfico da curva granulométrica da argila



Fonte: (Autor- 2020)

Portanto, essa caracterização qualifica esse solo para a produção do tijolo ecológico, conforme critérios estabelecidos pela norma NBR 10832/13.

5.1.2.2 Granulometria das Areias

Foram selecionadas 500 g de cada uma das amostras de areias para ser levada a estufa, onde a mesma permaneceu por 24 horas em uma temperatura de 110°C. Em seguida realizou-se a análise granulométrica com o objetivo de determinar as dimensões das partículas que constituem a amostra através do peneiramento a seco para obter a separação de partículas sólidas em frações de granulometrias diferentes. Com os resultados, é possível determinar a dimensão máxima (Dmáx) do agregado miúdo como sendo a abertura da malha, em milímetros, da peneira que contém uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5%. E também determinar o módulo de finura de um agregado que é calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100. O módulo de finura também serve para comparação entre dois ou mais agregados. Aquele que possuir menor módulo de finura é o material mais fino. A NBR 7211/2009 apresenta valores de módulo de finura para areias consideradas bem graduadas, conforme o quadro 9 a seguir:

Quadro 9 - Classificação da areia quanto ao módulo de finura

Classificação da Areia	Módulo de Finura
Muito Fina	1,39 a 1,70
Fina	1,71 a 2,11
Média	2,12 a 3,38
Grossa	3,39 a 4,02
Areia de Praia	1,39

Fonte: (Autor- 2020)

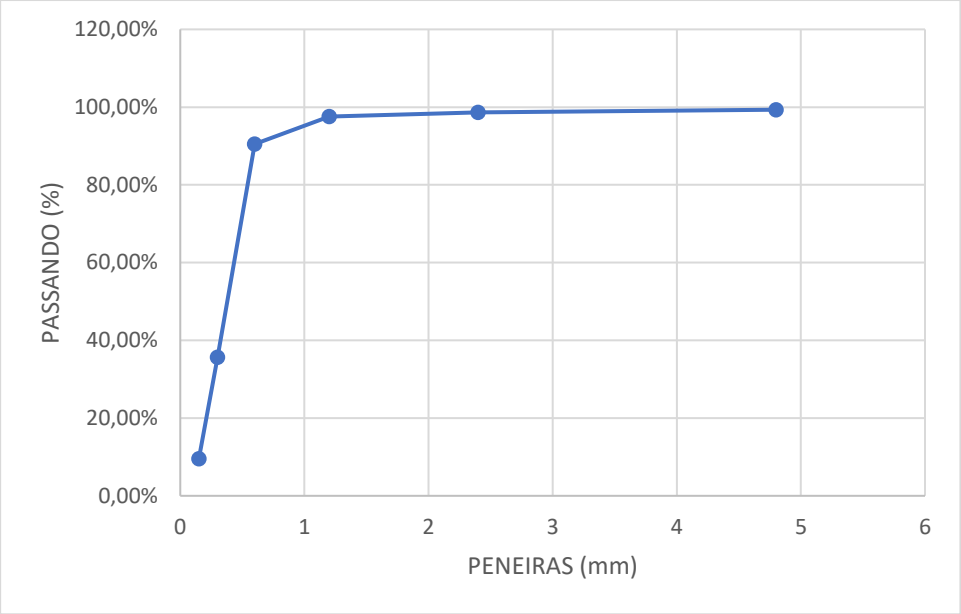
Os materiais foram peneirados para determinar percentual de grãos retidos e passantes como mostra o quadro 10 e 11, os gráficos das curvas granulométricas estão descritos nas figuras 32 e 33 representa o gráfico à disposição granulométrica do agregado miúdo.

Quadro 10 – Resultado da granulometria do agregado miúdo

PENEIRAS		PESO RETIDO (g)	PORCENTAGEM RETIDA	PORCENTAGEM RETIDA ACUMULADA	PORCENTAGEM PASSANDO
POL	mm				
N°4	4,80	6,72	0,67%	0,67%	99,33%
Nº 8	2,40	6,67	0,67%	1,34%	98,66%
Nº 16	1,20	10,62	1,06%	2,40%	97,60%
Nº 30	0,60	71,48	7,15%	9,55%	90,45%
Nº 50	0,30	547,92	54,82%	64,37%	35,63%
Nº 100	0,15	260,55	26,07%	90,44%	9,56%
FUNDO		95,46	9,55%	99,99%	
TOTAL		999,42	MÓDULO DE FINURA		1,69mm

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 32 – Gráfico da curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: (Autor- 2020)

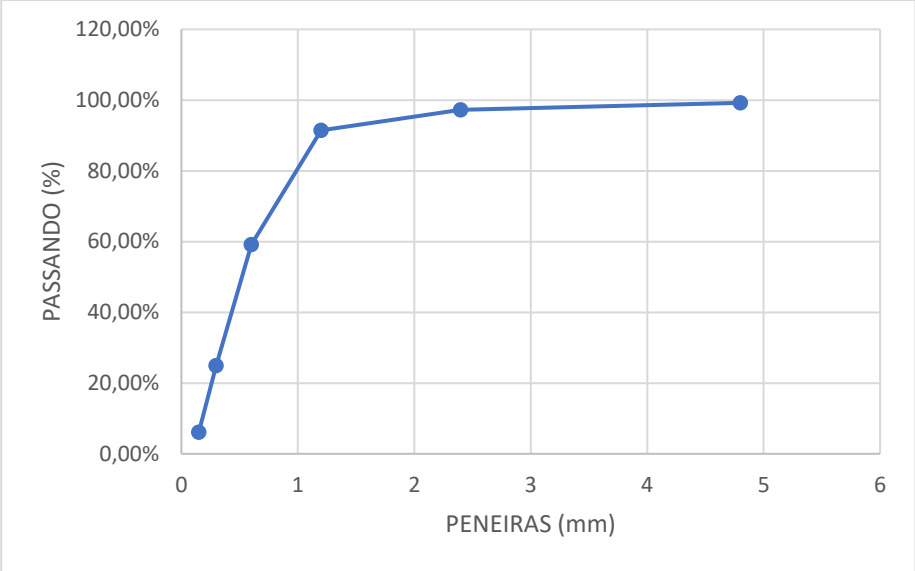
Com o resultado obtido na análise granulométrica, foram determinados o diâmetro máximo e o módulo de finura do agregado miúdo (areia), os quais são: 1,20 mm e 1,69 mm respectivamente. Com esses resultados, a areia analisada é classificada como uma areia muito fina.

Quadro 11 – Resultado da granulometria do agregado miúdo

PENEIRAS		PESO RETIDO (g)	PORCENTAGEM RETIDA	PORCENTAGEM RETIDA ACUMULADA	PORCENTAGEM PASSANDO
POL	mm				
N°4	4,80	7,65	0,77%	0,77%	99,23%
Nº 8	2,40	19,36	1,94%	2,71%	97,29%
Nº 16	1,20	58,00	5,80%	8,51%	91,49%
Nº 30	0,60	323,00	32,31%	40,82%	59,18%
Nº 50	0,30	342,53	34,26%	75,08%	24,92%
Nº 100	0,15	187,68	18,77%	93,85%	6,15%
FUNDO		61,60	6,16%	100,01%	
TOTAL		999,82	MÓDULO DE FINURA		2,22mm

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 33 - Gráfico da curva granulométrica da areia média



Fonte: (Autor- 2020)

Com o resultado obtido na análise granulométrica, foram determinados o diâmetro máximo e o módulo de finura do agregado miúdo (areia), os quais são: 2,40 mm e 2,22 mm respectivamente. Com esses resultados, a areia analisada é classificada como uma areia média.

Segundo a ABNT NBR 7211/2009 a curva granulométrica do agregado miúdo pode pertencer tanto a uma zona utilizável quanto a uma zona ótima.

- O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20
- O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Como pode ser observado nas figuras 32 e 33, os gráficos das amostras analisadas encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma como zona utilizável inferior para areia fina e zona ótima para areia média.

Com a caracterização dos agregados miúdos coletados no rio Poti é possível verificar pela análise granulométrica a diferença entre as amostras coletadas e classificá-las com segurança devido à determinação do diâmetro máximo e do módulo de finura que os agregados miúdos em estudo se trata de areia fina e areia média, fator de fundamental importância para dar sequência ao desenvolvimento deste trabalho.

5.1.3 Fluorescência de raios – x das matérias-primas

5.1.3.1 FRX da argila

A Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica que permite a identificação dos elementos constituintes no solo, como também permite observar a proporção de cada elemento na amostra (SOARES, 2008). A análise química da argila utilizada na pesquisa é apresentada na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Análise Química por Fluorescência de Raios-X da argila.

Análise Química por Fluorescência de Raios-X da argila (%)				
Amostra	(SiO_2)	(Al_2O_3)	(Fe_2O_3)	Outros
Argila	61,27	18,69	15,61	4,43

Fonte: (Autor- 2020)

Conforme verificado na análise (tabela 3), não há presença de CaO, pois é um óxido pernicioso, quando encontrado em quantidade significativa, e dependendo de sua granulometria, pois em locais com umidade elevada pode trazer danos ao bloco em função da hidratação do óxido, que se expande na presença de água, podendo ocasionar fissuras no mesmo, reduzindo a resistência mecânica. Na mostra também foram encontradas como composições majoritários óxido de silício (SiO_2) 61,27% e o óxido de alumínio (Al_2O_3) 18,69%, que estão associados aos componentes argilominerais. A hematita (Fe_2O_3) 15,61% como a terceira maior concentração na argila, este componente confere a coloração avermelhada da argila.

5.1.3.2 FRX das areias

A Fluorescência de Raios-X (FRX) das areias apresentadas tabela 4 são qualitativas, mas, a partir dos resultados, podemos ter uma noção sobre os principais óxidos que constituem as amostras.

Em relação às amostras das areias, é predominantemente composta de óxido de silício SiO_2 (91,76% e 94,22), porém apresenta uma porcentagem de óxido alumínio Al_2O_3 (5,63% e 3,64%), a porcentagem de óxido de ferro Fe_2O_3 (0,71% e 0,77%) é pequena, e apresentam apenas traços de outros óxidos os resultados são para areia fina e média respectivamente.

Tabela 4 - Análise Química por Fluorescência de Raio-x da areia fina e média.

Análise Química por Fluorescência de Raio-X das areias fina e média (%)				
Amostra	(SiO_2)	(Al_2O_3)	(Fe_2O_3)	Outros
Areia fina	91,76	5,63	0,71	1,90
Areia média	94,22	3,64	0,77	1,39

Fonte: (Autor- 2020)

Observa-se que a areia fina e areia média, de uma forma geral, existe considerável semelhança na composição química das amostras.

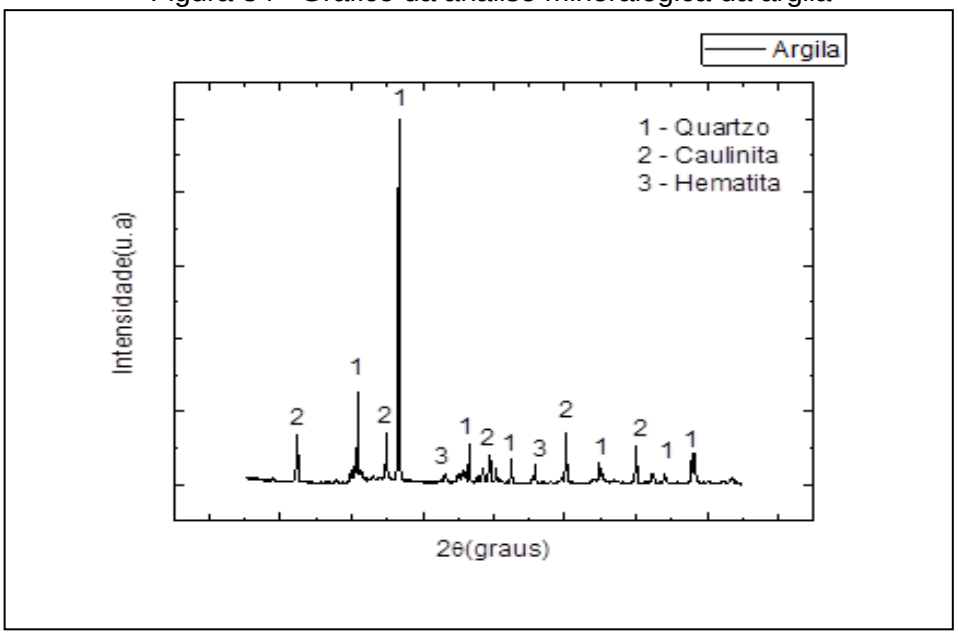
5.1.4 Difratograma de raios-x das matérias-primas

5.1.4.1 DRX da Argila

Na análise mineralógica da argila foram observadas a presença dos argilominerais como quartzo (SiO_2), caulinita($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e hematita (Fe_2O_3) que corrobora com o resultado do FRX apresentado na tabela 3. Argilas constituídas por esses argilominerais possuem, em elevado grau, propriedades plásticas e coloidais, e justificam grandes variações em suas propriedades físicas (Souza Santos, 1989). Dessa forma a presença da caulinita fornece ao material uma característica de maior plasticidade, o que pode aumentar a resistência inicial dos tijolos, facilitando o desmolde da máquina de compressão. O quartzo tem a função de manter a estabilidade dimensional da peça durante a moldagem e secagem dos tijolos podendo atuar como material de enchimento, facilitando a saída da água utilizada.

A Figura 34 mostra o resultado do difratograma de Raios-X – DRX da argila utilizada neste trabalho.

Figura 34 - Gráfico da análise mineralógica da argila



Fonte: (Autor- 2020)

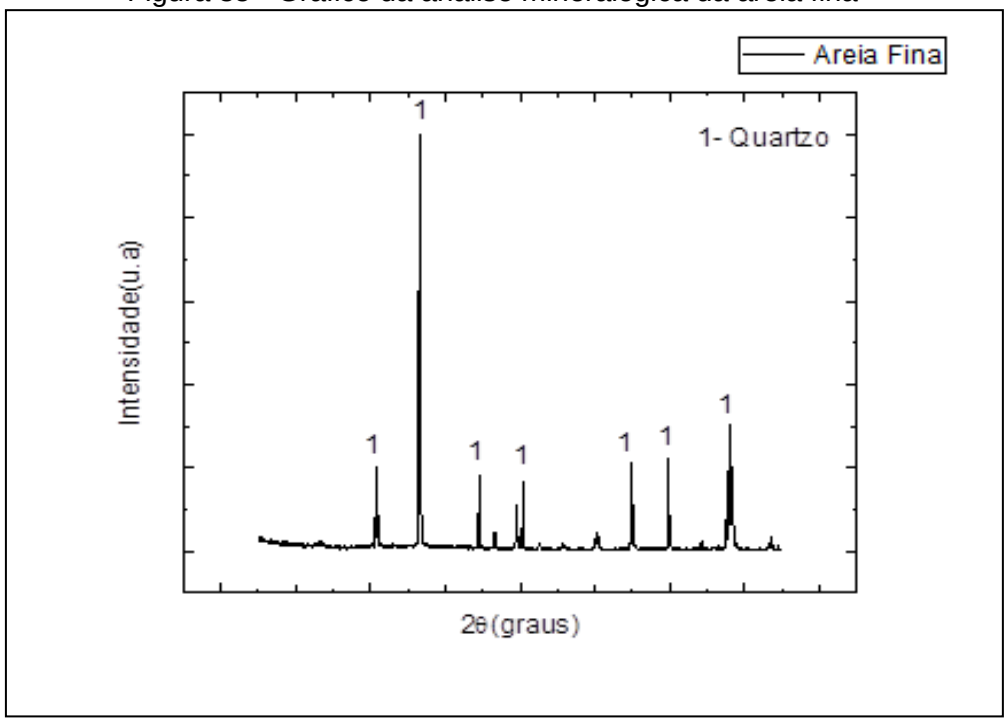
Com base nos resultados desses ensaios realizados no solo em estudo pode-se concluir que o mesmo é considerado ideal para se trabalhar na produção de tijolos ecológicos em razão de ter em sua composição uma fração de argila necessária para estabilizar com o cimento e quantidade de finos para permitir a moldagem, entretanto, o solo precisa de correção com outro tipo de material e, para este trabalho foram utilizados areia fina e areia média para correções necessárias de acordo com os resultados apresentados nos ensaios preliminares da caixa — retração do solo, do vidro e o índice de plasticidade da argila.

5.1.4.2 DRX das areias

Nas análises das areias é possível identificar os minerais que as compõem através dos compostos químicos, e o seu grau de cristalinidade através da intensidade dos picos formados por esses compostos. Segundo Marinoni (2012), a intensidade dos picos de difração de raios-X indica a organização cristalina dos minerais, quanto maior o pico menos deformado se encontra o material, tornando mais estável.

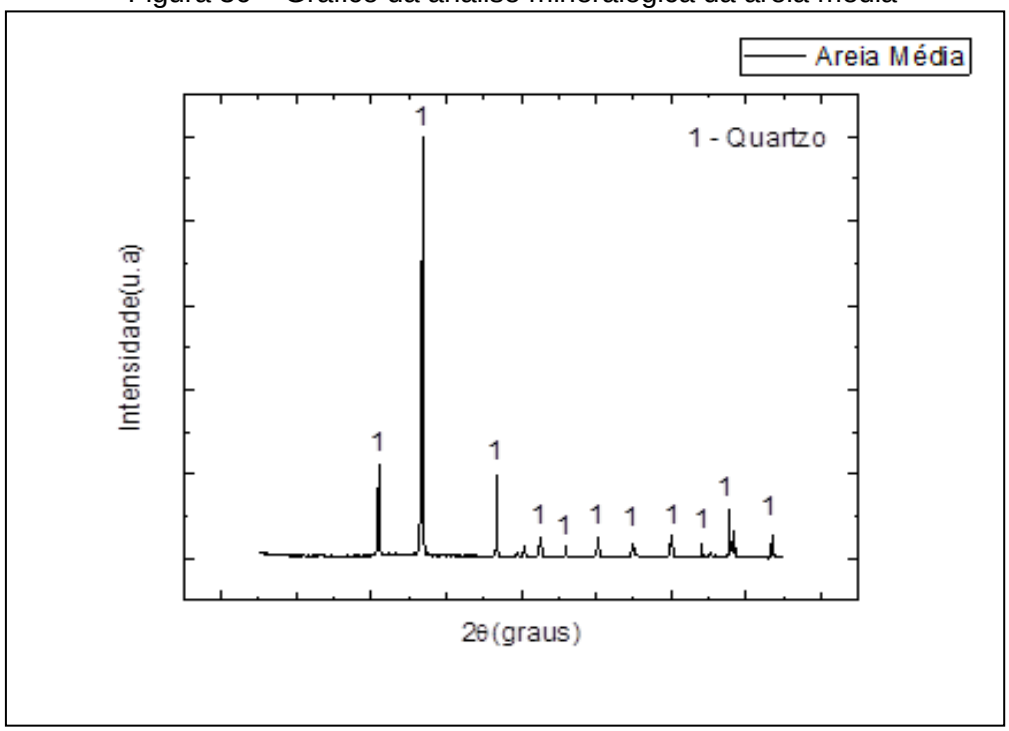
Os difratogramas de raios-X das areias fina e média estão apresentados na figura 35 e 36.

Figura 35 - Gráfico da análise mineralógica da areia fina



Fonte: (Autor- 2020)

Figura 36 – Gráfico da análise mineralógica da areia média



Fonte: (Autor- 2020)

Observando-se as figuras 35 e 36, onde se apresentam os gráficos dos difratogramas de raios-X referente às amostras de areia fina e areia média, usadas neste trabalho para compor os corpos de provas preparados a partir das formulações

F1, F2, F3 e F4, pode-se constatar que basicamente apresentam uma única fase: quartzo (SiO_2) corroborando com o resultado da fluorescência de raios-X. Conforme apreciação dos resultados, as areias estudadas são formadas por minerais de estruturas cristalinas bem definidas, desse modo, apresentam-se estáveis, sem riscos de reações patológicas quando utilizadas como agregado no tijolo ecológico. A tabela 5 apresenta a análise racional das matérias-primas:

Tabela 5: Concentração das fases cristalinas (%) das matérias-primas

Amostras	Quartzo	Caulinita	Hematita	Outros
Argila	37,0%	47,0%	16,0%	
Areia Fina	92,5%	-	-	7,5%
Areia Média	95,0%	-	-	5,0%

Fonte: (Autor- 2020)

A análise racional da argila determinada por meio do software QuantFases 1.1, demonstrou uma predominância da fase caulinita, confirmando que a mesma apresenta uma maior plasticidade que confere aos tijolos ecológicos uma resistência após prensagem e secagem. Para a análise racional as areias demonstraram uma predominância de quartzo, ressalta-se também a adição de areia proporciona a diminuição da massa plástica da argila auxiliando na redução da plasticidade melhorando a trabalhabilidade no processo de conformação dos tijolos ecológicos.

5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para a realização dos ensaios de absorção de água foram confeccionados 3 corpos de prova para cada tipo de formulação, sendo utilizados corpos de prova de cada formulação nas idades de 28 e 56 dias.

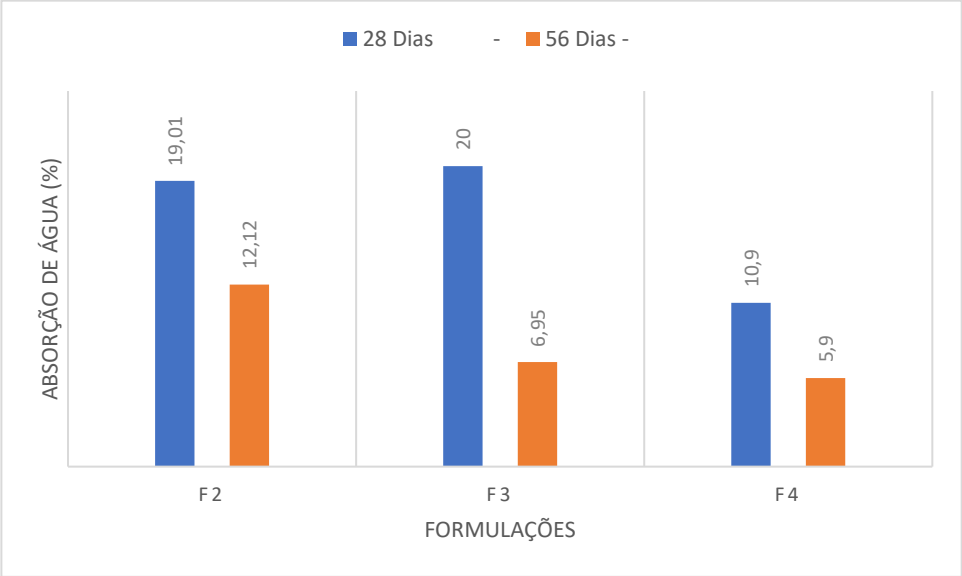
Na tabela 6 e figura 37 tem-se o gráfico da representação dos resultados das capacidades de absorção de água em média das formulações aos 28 e aos 56 dias de idade. Apenas os corpos de provas preparados a partir dos corpos de prova da formulação F1 não foi possível obter o peso úmido, pois, o mesmo se esfarelou facilmente ao ser imerso em um recipiente por 24h.

Tabela 6- Valores de absorção de água em média para os corpos de prova

Absorção de água em média (%)		
FORMULAÇÕES	28 dias	56 dias
F1	-	-
F2	19,01	12,12
F3	20,00	6,95
F4	10,90	5,90

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 37 – Gráfico do resultado do ensaio de absorção de água



Fonte: (Autor- 2020)

Verificou-se que os corpos de prova das formulações confeccionadas apresentaram valores médios de absorção de água no limite imposto pela NBR 8491 (ABNT, 2012) correspondente a 20%. Em relação aos os corpos de provas preparados com as formulações F2 e F3, considerando as duas idades avaliadas, observa-se que para 28 dias há um aumento da capacidade de absorção e, aos 56 dias há uma diminuição dessa capacidade, estas reduções estão relacionadas às condições ambientais bem como às composições das formulações estudadas. Isso pode estar associado a uma perda mais rápida da água de constituição dos corpos de prova das formulações F2 e F3 compostos de areia média, deixando mais espaços vazios, que além de ocasionar mais absorção de água, também determinam a densidade dos corpos de prova. Quanto mais vazios existirem

no corpo de prova, menor será sua densidade. Os corpos de provas preparados a partir da formulação F4 apresentaram menor absorção aos 56 dias, obtendo uma redução significativa por conta da diminuição da porosidade associada a proporção de areia fina adicionada na composição de argila mais a hidratação do cimento. É válido ressaltar que o corpo de prova F1 (formulação padrão) apresentou desagregação e deformação nas superfícies durante a realização dos ensaios nas duas idades estudadas, isso deve-se ao elevado teor de quartzo presente na formulação.

A partir dos ensaios de absorção dos corpos de prova das amostras estudadas F2, F3 e F4 constatou-se que diminuíram sua umidade ao longo do tempo de cura, essa queda de absorção verificada na figura 38, é justificada pela contínua evolução da hidratação do cimento, que reduz os vazios entre as partículas do solo reduzindo a porosidade e consequentemente reduz a absorção de água aumentando a sua densidade e resistência.

5.3 ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM

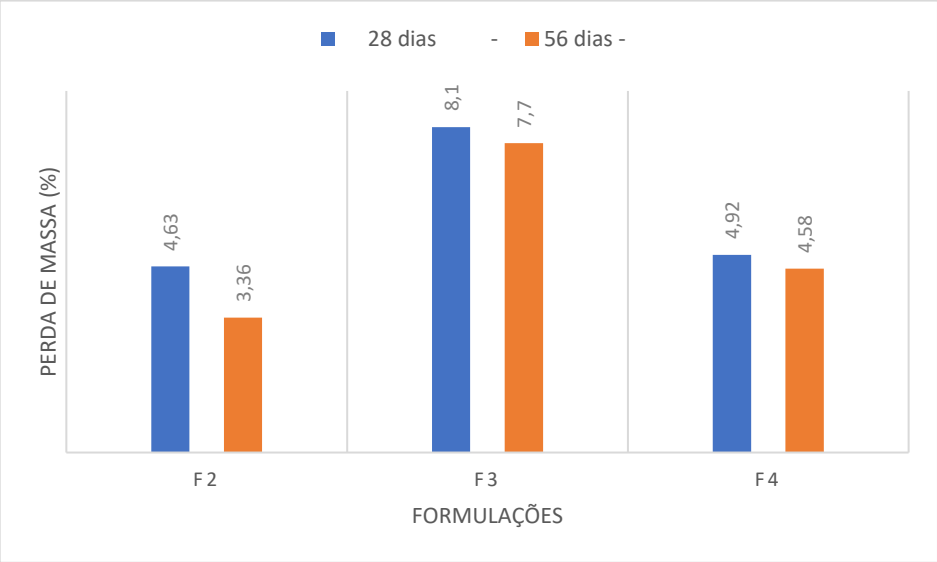
A tabela 7 e a figura 38 apresentam os corpos de prova das formulações F2, F3 e F4 confeccionadas, resultantes dos ensaios de durabilidade por imersão e secagem NBR 13554/12 realizados aos 28 e aos 56 dias.

Tabela 7 – Perda de massa por durabilidade em média

Perda de massa por durabilidade em média (%)		
FORMULAÇÕES	28 dias	56 dias
F1	-	-
F2	4,63	3,36
F3	8,10	7,70
F4	4,92	4,58

Fonte: (Autor- 2020)

Figura 38- Gráfico das perdas de massa no ensaio de durabilidade



Fonte: (Autor- 2020)

Diante dos resultados mostrados na tabela 7 e observados na figura 38 apenas os corpos de prova da formulação F1(formulação padrão) não apresentaram resultados no ensaio aos 28 dias, pois, o mesmo não suportou as escovações vindo a esfarelar no segundo ciclo apresentando também quebra. Os corpos de prova compostos pela formulação F3 não apresentaram boas condições estéticas no ensaio aos 28 e 56 dias, com a presença de fissuras e facilmente desintegráveis, isso deve ao alto teor de quartzo presente na formulação. Os corpos de prova das formulações F2 e F4 atenderam ao limite máximo de 10% de perda de massa imposto pela ABCP. Os menores valores de perda de massa estão associados aos corpos de prova das formulações F2 e F4, que apresentaram dificuldade na desintegração do material e boas condições estéticas. Nos corpos de provas das formulações F2 e F4 observa-se a redução da perda de massa com o passar do tempo, podendo ser um indicativo do potencial de desempenho dos corpos de prova.

5.4 CONFORTO TÉRMICO

Os quadros 12 e 13 e a figura 39 apresentam, respectivamente, os dados referentes às temperaturas aferidas no ensaio de conforto térmico para dois modelos de minicasas construídas com os corpos de prova da formulação F2 que chamaremos de neste trabalho de blocos ecológicos (B.E.) e tijolo cerâmico (T.C.).

Com base nos resultados expressos nos quadros 11 e 12, a minicasa construída com bloco ecológico (B.E.) dos corpos de prova da formulação F2 observa-

se que durante os turnos: manhã, tarde e noite apresenta um melhor conforto térmico que o modelo feito apenas de tijolo cerâmico (T.C.), por tanto, é pertinente afirmar que o modelo construído com os blocos ecológicos (B.E.) apresentou uma redução de aproximadamente 1,0 °C.

Quadro 12 - Temperaturas em °C para o modelo construído com bloco ecológico

MINICASA COM BLOCOS ECOLÓGICOS – F2			
Dia	07:00	14:00	19:00
1	28.6°C	38.8°C	30,9°C
2	29,7°C	39,6°C	29,9°C
3	29,0°C	39,3°C	31,1°C
4	28,9°C	38,3°C	31,0°C
5	27,3°C	34,0°C	29,2°C
MÉDIA	28,7°C	38,0°C	30,42°C

Fonte: (Autor- 2020)

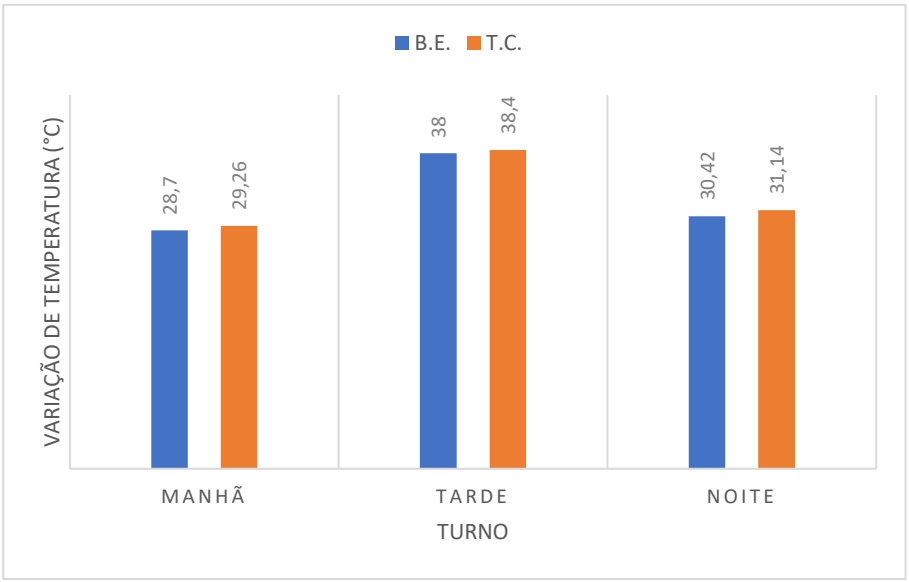
Quadro 13 - Temperaturas em °C para o modelo construído com tijolo cerâmico

MINICASA COM TIJOLO CERÂMICO			
Dia	07:00	14:00	19:00
1	29,0°C	38,9°C	32,4°C
2	29,9°C	39,0°C	31,2°C
3	29,1 °C	39,1°C	31,3°C
4	29,4°C	39,2°C	31,4°C
5	28,9°C	35,8°C	29,4°C
MÉDIA	29,26°C	38,4°C	31,14°C

Fonte: (Autor- 2020)

A figura 39 mostra o gráfico das respectivas temperaturas em média para as minis casas construídas.

Figura 39 – Gráfico da temperatura média por turno para os modelos das mini casas construídas



Fonte: (Autor- 2020)

Constatou-se que a mini casa construída de blocos ecológicos (B.E.) proporcionou menores valores médios de conforto térmico que o modelo construído com tijolo cerâmico (T.C.) comprovando assim sua eficiência térmica na transferência de calor no ambiente.

5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

A tabela 8 e a figura 40 apresentam os valores médios dos ensaios de resistência à flexão dos corpos-de-prova ensaiados com 7, 14, 28 e 56 dias. Os resultados obtidos com o estudo de diferentes períodos de cura estão em conformidade com a norma ASTM-C99 (ABNT-NBR 12763). Para os corpos de prova observa-se a carga atingida no instante da ruptura, a distância entre os apoios e a largura. Para este ensaio, utilizou-se dos corpos de prova do tipo vigotas, disposto no equipamento e depois ensaiado. Estes resultados são baseados nos trabalhos dos autores, Xavier (2001) e Almeida (2012), também nos valores obtidos neste trabalho.

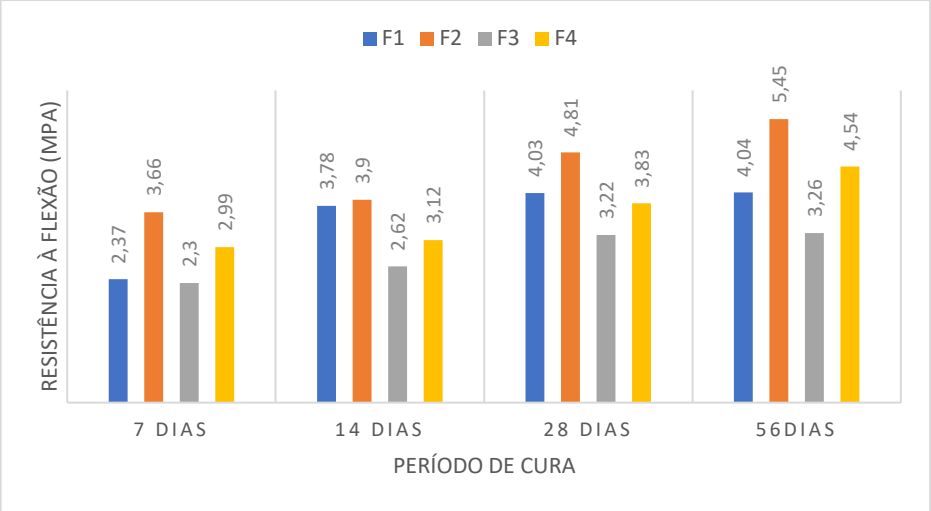
Tabela 8 - valores médios dos ensaios de resistência a flexão dos corpos de prova

FORMULAÇÃO F1 – 1:3:7- AREIA FINA				
CURA:	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	56 DIAS
RESISTÊNCIA EM MÉDIA (MPa)	2,37	3,78	4,03	4,04
FORMULAÇÃO F2 – 1:5:5 AREIA MÉDIA				
CURA:	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	56 DIAS
RESISTÊNCIA EM MÉDIA (MPa)	3,66	3,90	4,81	5,45
FORMULAÇÃO F3- 1:4:6 AREIA MÉDIA				
CURA:	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	56 DIAS
RESISTÊNCIA EM MÉDIA (MPa)	2.30	2,62	3,22	3,26
FORMULAÇÃO F4- 1:5:5 AREIA FINA				
CURA:	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	56 DIAS
RESISTÊNCIA EM MÉDIA (MPa)	2,99	3,12	3,83	4,54

Fonte: (Autor- 2020)

Na tabela 8 apresenta o ganho de resistência dos corpos de provas ao longo de 56 dias de cura. Os corpos de provas das formulações F1, F2, F3 e F4 obtiveram, já a partir do sétimo dia de cura, valores de resistência à flexão, comparados ao valor mínimo exigido pela NBR 10836/13, de 2,0 MPa, vale ressaltar que esse parâmetro pode ser realizado devido à pressão exercida, onde se aplicou o dobro (50 MPa) critério adotado como parâmetro a ser avaliado nesta pesquisa na busca da otimização da qualidade do produto final. Estes resultados devem-se também às análises nas matérias-primas escolhidas para as formulações, aquela que apresentou maior concentração de argila possui uma resistência à flexão superior.

Figura 40 – Resultado da resistência a flexão dos corpos de prova



Fonte: (Autor- 2020)

A tabela 8 e o gráfico da figura 40 mostram que os corpos de provas da formulação padrão F1 atingiu melhores resultados em relação aos corpos de provas da formulação F3, apesar dos corpos de provas da formulação padrão F1 ter maior concentração de areia, isso se explica pela diferença entre os materiais aplicados, nos corpos de provas da formulação padrão F1 utilizou-se areia fina e para os corpos de provas da formulação F3 areia média. Outro fator que contribuiu para este resultado foi o aumento na pressão de compactação, isso confirma que a pressão de compactação exercida promoveu um ajuste da massa dos corpos de provas da formulação padrão F1 que melhorou o desempenho em relação aos corpos de provas da formulação F3, comprovando que solos mais granulares, tais como as areias, necessitam de maiores pressões de moldagem.

Observa-se que durante o período de cura de 7 a 56 dias os corpos de provas da formulação F2 (corrigida com areia média) e os corpos de provas da formulação F4 (corrigida com areia fina) tiveram a maior resistência devido ao aumento da concentração de argila. Nota-se que para os corpos de provas da formulação F2 apresentou um melhor agrupamento dos grãos em relação aos corpos de provas da formulação F4, indicando que solos mais granulares necessitam de uma maior pressão de compactação.

O aumento da concentração de argila e diminuição da areia promoveu o aumento da resistência, por conta da diminuição da porosidade associada a proporção de areia adicionada na composição promovendo a hidratação do cimento. A maioria dos construtores de solo-cimento existentes no mercado desconhece a importância

dos estudos para uma formulação adequada, evitando desperdícios. Sendo assim, a determinação e o estudo das características dos solos proporcionam a otimização e melhoria da resistência uma vez que são consideradas as vantagens naturais de cada tipo de solo melhorando-as com o acréscimo de cimento. Outro fator importante é a adequação da pressão de compactação, pois, a mesma possui variação dependendo de cada prensa comercializada, portanto, para bons resultados e produtos mais resistentes é imprescindível fazer ajuste na pressão que imprime ao solo.

5.6 MODELO MATEMÁTICO RELACIONADO AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Formulação do Modelo: aqui a linguagem matemática entra em ação substituindo a linguagem usual anteriormente para a formulação das hipóteses. “A construção do modelo segue de perto o uso de um dicionário que traduz as palavras chaves em alguma estrutura matemática” (BASSANEZI, 2011). Inicialmente verifica-se a variação da resistência à flexão em relação ao período de cura. As resoluções dos modelos estudados foram resolvidas pelas análises das equações dos gráficos. A comparação é feita por intermédio dos resultados obtidos nos corpos de prova para os ensaios de resistência à flexão, realizados nos períodos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias. Nesse ponto é necessário verificar a proximidade dos dados com o que foi “projetado” inicialmente por meio das hipóteses formuladas por F1 (formulação padrão), F2, F3 e F4. A aplicação do modelo permitirá um estudo das resistências das formulações em dias de cura. Em linguagem matemática, temos a variação média desta resistência nos tempos citados que é dada pela análise de regressão linear simples. A análise de regressão linear tem como resultado uma regressão matemática que descreve o relacionamento entre duas variáveis. Utiliza-se a Regressão Linear para estimar o valor de uma variável com base em valores conhecidos de outro. Pressupõe-se alguma relação de causa e efeito, de explanação do comportamento entre as variáveis. Na tabela 9 estão as equações geradas pelos gráficos em cada formulação.

Tabela 9 – Equações geradas pelos gráficos de F1, F2, F3 e F4

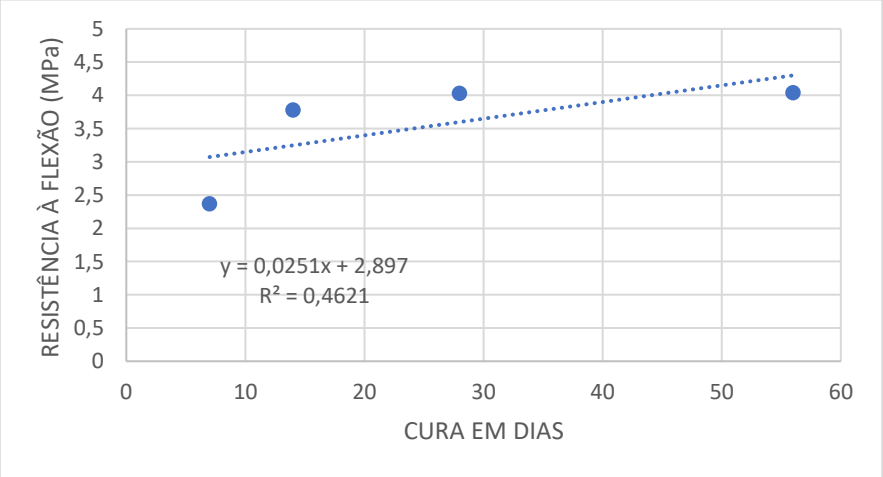
F1 (FP)	y = 0,0251x + 2,897	R^2 = 0,4621	Inc=0,0251	Int=2,8970
F2	y = 0,0374x + 3,477	R^2 = 0,9468	Inc=0,0374	Int=3,4770
F3	y = 0,0186x + 2,3609	R^2 = 0,7407	Inc=0,0186	Int=2,3609
F4	y = 0,0326x + 2,763	R^2 = 0,9766	Inc=0,0326	Int=2,7630

(* R^2 = coeficiente de determinação * Inc = Inclinação * Int = Intercepto)

Fonte: (Autor- 2020)

O coeficiente de determinação linear R^2 é o indicador usado para medir a qualidade do ajustamento de uma linha de regressão. Varia entre 0 e 1, indicado, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2, mais explicativo é o modelo, ou seja, o que melhor se ajusta à amostra. Teoricamente, se um modelo pudesse explicar 100% da variância, os valores ajustados seriam sempre iguais aos valores observados, portanto, todos os pontos de dados pertenceriam à linha de regressão linear.

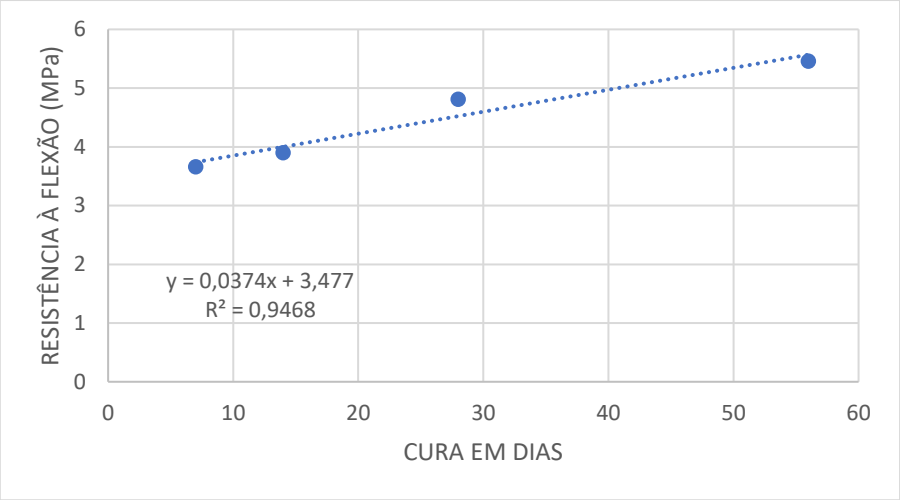
Figura 41 - Gráfico de regressão para F1 (FP)



Fonte: (Autor- 2020)

O gráfico da regressão linear, definido para F1 apresenta o coeficiente de determinação linear R^2 abaixo de 50%, indicando que o modelo apresentado não é o mais confiável.

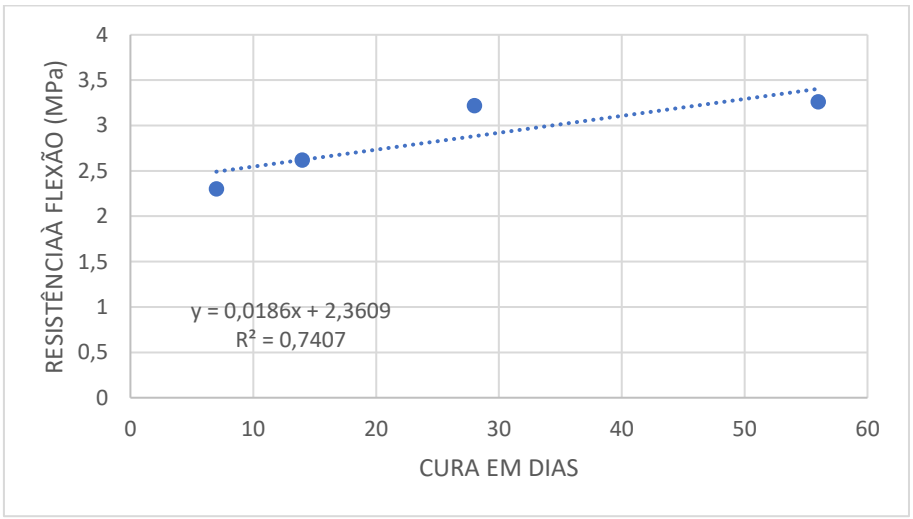
Figura 42 - Gráfico de regressão para F2



Fonte: (Autor- 2020)

O modelo de regressão para F2 apresenta 95% da variância. Quanto mais próximos os pontos estiveram em relação à linha de regressão, mais confiável será o modelo.

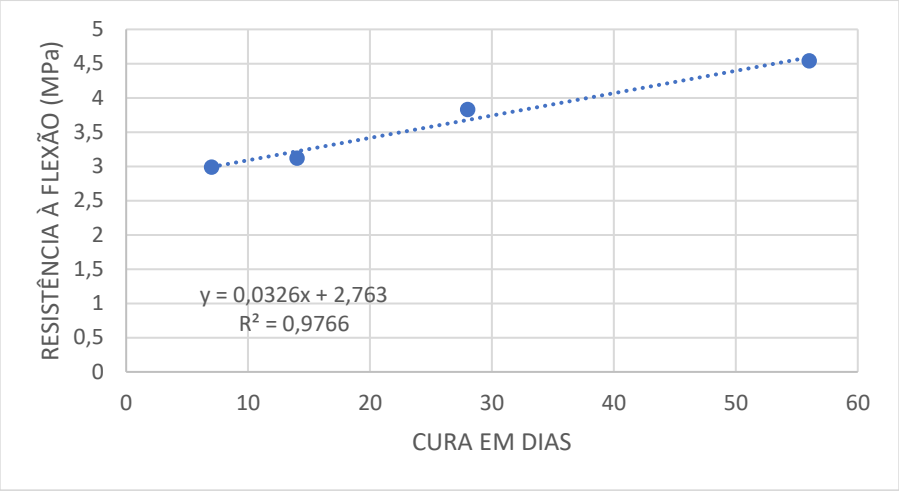
Figura 43 - Gráfico de regressão para F3



Fonte: (Autor- 2020)

Para a regressão linear em F3, R^2 é de 74%, com isso, podemos dizer que a regressão pode determinar a variação dos dados.

Figura 44- Gráfico de regressão para F4



Fonte: (Autor- 2020)

O gráfico de linha ajustada mostra que esses dados de F4 seguem os pontos bem próximo da linha de regressão e o R-quadrado apresenta 98% de confiabilidade do fenômeno estudado.

De acordo com os modelos matemáticos obtidos nas 4 formulações, podemos exemplificar a seguinte situação de otimização de produção e de qualidade do tijolo ecológico: suponha que oleiro dispõe dessas 04 formulações para produção de seu tijolo ecológico e deseja comercializar seu produto com o dobro de resistência mínima exigida pela norma NBR 8492/12 (4 MPa) e no menor espaço de tempo possível.

Nos gráficos apresentados nas figuras 41 a 44 observa-se que o melhor resultado otimizado esperado pelo oleiro está no gráfico da formulação F2 que obteve a resistência de 4 MPa a partir de 14 dias.

Ao analisar o gráfico F1, o oleiro percebeu que esta resistência ocorreu aos 45 dias. O gráfico para F3 não é possível determinar que a resistência de 4 MPa no período de 7 a 56 dias de cura e para concluir a análise temos gráfico F4, onde se verifica que a resistência adotada acontecerá aos 37 dias.

Ao observar os resultados obtidos nos cálculos em cada equação o oleiro concluiu, então que a formulação mais adequada para produzir e vender o tijolo ecológico é a formulação F2, a mesma apresenta aumento significativo de resistência otimizando período de cura se comparada às demais formulações, sendo assim, pode ser comercializada em um curto espaço de tempo sem colocar em risco a qualidade do produto e a segurança da obra.

5.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA RELACIONADA AO TEMPO DE CURA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Neste trabalho, temos um experimento de fabricação de corpos de prova. Onde há 4 formulações F1(formulação padrão), F2, F3 e F4 em 4 tempos de cura, sendo eles: 07, 14, 28 e 56 dias; gerando 16 grupos, de modo a se verificar qual oferece a maior resistência sendo, portanto, a formulação mais indicada para produção do tijolo ecológico a ser utilizada. Abaixo no quadro 14, segue a média de resistência em MPa dos corpos de prova em cada grupo:

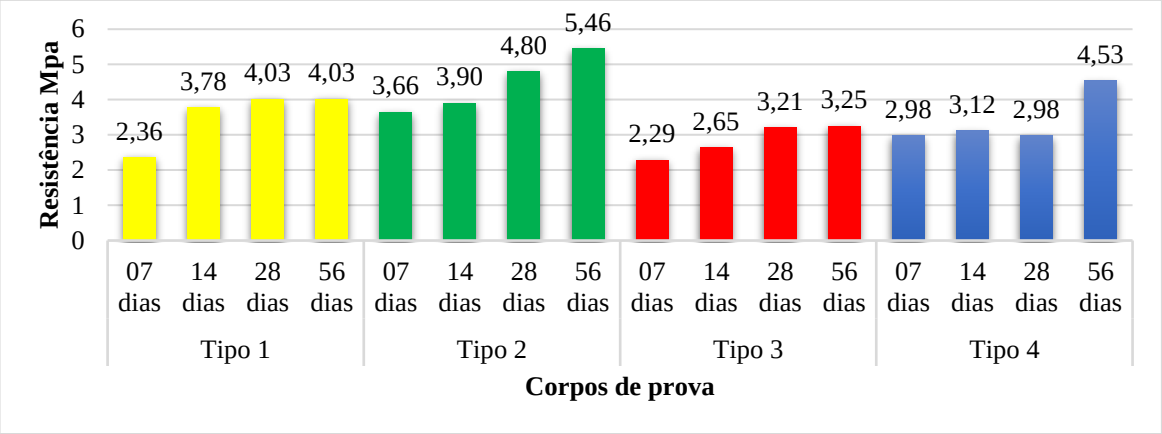
Quadro 14 - Médias dos grupos de tijolos fabricados de acordo com sua composição e tempo de cura.

Tipo de fabricação	Tempo de cura	Média	Tipo de fabricação	Tempo de cura	Média
Tipo 1 - F1	07 dias	2,36314	Tipo 3 - F3	07 dias	2,29371
	14 dias	3,77871		14 dias	2,65114
	28 dias	4,02814		28 dias	3,21171
	56 dias	4,03071		56 dias	3,25414
Tipo 2 - F2	07 dias	3,65786	Tipo 4 - F4	07 dias	2,98157
	14 dias	3,90343		14 dias	3,11529
	28 dias	4,80343		28 dias	2,98157
	56 dias	5,45657		56 dias	4,53086

Fonte: (Autor- 2020)

No quadro 13, observamos que os corpos de prova da formulação F2 com tempo de 56 dias de cura tem a maior média de resistência, como também evidencia o gráfico abaixo na figura 45.

Figura 45 - Gráfico das médias dos grupos dos corpos de prova de acordo com sua resistência e tempo de cura.



Fonte: (Autor- 2020)

Para corroborar a análise descritiva feita em torno da média, foram realizados testes experimentais por meio da análise de variância (ANOVA), que utiliza Teste F para verificar se, estatisticamente, os grupos são ou não iguais, todavia, ao se testar a normalidade dos dados (se os dados seguem ou não uma Distribuição Normal) e, pela disposição dos dados, não foi constatado se os dados seguem uma Distribuição Normal, comprovado também pelo teste de Shapiro-Wilk, exposto na tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Teste de Normalidade dos dados.

	Kolmogorov-Smirnov[a]					
	Estatística	Graus de Liberdade	P-Valor	Estatística	Graus de Liberdade	P-Valor
Mpa	,108	112	,003	,915	112	,000

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: (Autor- 2020)

Pelo Teste de Shapiro-Wilk, identificamos o P-valor menor que 0,05; então recorremos a testes não-paramétricos, visando uma análise segura dos dados. Foi escolhido o Teste de Kruskal-Wallis de *K* Amostras independentes, uma vez que esse é o teste não-paramétrico correspondente à ANOVA e, em nosso banco de dados, há 16 grupos independentes de formulações dos corpos de prova (4 tipos de formulações e 4 tempos de cura), a fim de verificar se, estatisticamente, os grupos são iguais. No quadro 15 e tabela 11 temos o resultado do Teste de Kruskal-Wallis, feito por meio do programa estatístico Statistical Packages for the Social Sciences (SPSS), versão 22

para sistema operacional Windows:

Quadro 15- Teste de Kruskal-Wallis – Classificações.

Classificações			
Formulação		Qtd. de amostras	Postos de média
Mpa	1,00	7	33,64
	2,00	7	58,00
	3,00	7	68,50
	4,00	7	60,64
	5,00	7	63,64
	6,00	7	73,36
	7,00	7	69,79
	8,00	7	88,00
	9,00	7	33,00
	10,00	7	38,71
	11,00	7	45,07
	12,00	7	40,36
	13,00	7	48,93
	14,00	7	52,21
	15,00	7	48,93
	16,00	7	81,21
	Total	112	-

Fonte: (Autor- 2020)

Tabela 11: Estatística do Teste de Kruskal-Wallis.

Teste	Mpa
Qui-quadrado	27,839
Graus de Liberdade	15
P-Valor	,023

a. Teste Kruskal Wallis; b. Variável de Agrupamento: Formulação

Fonte: (Autor- 2020)

Pelo p-valor calculado, o Teste de Kruskal-Wallis nos aponta que há pelo menos 1 grupo que se destaca dos demais, sendo necessário a aplicação de teste de post hoc, a fim de descobrir onde as diferenças existem. No experimento, optamos pelo Teste T de amostras pareadas 2 a 2, que é menos suscetível a erros de hipótese (Erro:

Tipo 1 – F1 e Tipo 2 – F2), sendo esse o teste não-paramétrico correspondente ao Teste Tukey, aplicado quando os dados não seguem a Distribuição Normal. Abaixo no quadro 16, temos os resultados para o Teste T Pareado.

Quadro 16 - Teste T para comparação de médias entre os grupos.

Tipo	Tijolo F1 07 dias	Tijolo F1 14 dias	Tijolo F1 28 dias	Tijolo F1 56 dias	Tijolo F2 07 dias	Tijolo F2 14 dias	Tijolo F2 28 dias	Tijolo F2 56 dias	Tijolo F3 07 dias	Tijolo F3 14 dias	Tijolo F3 28 dias	Tijolo F3 56 dias	Tijolo F4 07 dias	Tijolo F4 14 dias	Tijolo F4 28 dias	Tijolo F4 56 dias
Tijolo F1 07 dias	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F1 14 dias	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F1 28 dias	**Dif.**	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	**Dif.**	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F1 56 dias	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F2 07 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F2 14 dias	**Dif.**	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	**Dif.**	**Dif.**	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F2 28 dias	**Dif.**	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Dif.	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F2 56 dias	**Dif.**	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	Igual
Tijolo F3 07 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F3 14 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F3 28 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F3 56 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual	Igual
Tijolo F4 07 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual	Igual
Tijolo F4 14 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual	Igual
Tijolo F4 28 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	-	Igual
Tijolo F4 56 dias	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	**Dif.**	Igual	Igual	Igual	-
Média	2,363	3,779	4,028	4,031	3,658	3,903	4,803	5,457	2,294	2,651	3,212	3,254	2,982	3,115	2,982	4,531

Fonte: (Autor- 2020)

Pelo Teste T pareado, observamos que a formulação F2 que teve tempo de cura de 56 dias se sobressaiu dos demais exemplares, tendo a maior média de resistência e sendo estatisticamente diferente de outros 8 grupos, sendo eles: F1 (07 dias), F3 (07, 14, 28 e 56 dias) e F4 (07, 14 e 28 dias).

6. CONCLUSÕES

- Os resultados dos ensaios físicos e químicas mostraram que a massa argilosa estudada nesta pesquisa se mostrou apropriada para a fabricação do tijolo ecológico desde que essa argila seja corrigida com adição de areia.
- Os ensaios químicos e físicos para as areias usadas nesta pesquisa apresenta acima de 90% de Óxido de Silício e a distribuição bem graduada que permite um bom preenchimento dos espaços vazios do solo, favorecendo uma boa compactação e o aumento da resistência mecânica das amostras ensaiadas.
- Os corpos de provas com as formulações F2, F3 e F4 estudadas atenderam as regulamentações da norma 8491/2012, quanto a análise de absorção de água, em relação aos corpos de prova com formulação padrão F1 a desintegração do material em contacto com a água impossibilitou o ensaio de absorção.
- Nos ensaios de avaliação da durabilidade por ciclos de imersão e secagem os corpos de provas com as formulações F2, F4 atenderam satisfatoriamente ao limite máximo de 10% de perda de massa imposto pela ABCP, apesar dos corpos de prova da formulação F1(formulação padrão) esfarelar e da perda de massa excessiva dos corpos de prova da formulação F3 verificada no ensaio aos 28 dias. Observou-se, ainda, que houve diminuição da perda de massa dos corpos de prova nos ensaios realizados aos 56 dias.
- Os corpos de prova da formulação F2 apresentam argila e areia em proporções iguais e maior pressão de compactação aplicada aos corpos de prova. Observa-se que a resistência à flexão apresenta bons resultados para esta formulação, mostrando que a concentração de areia média foi benéfica no estudo de otimização para produção do tijolo ecológico.
- O modelo matemático é válido para se obter o resultado que apresenta formulação F2 como a formulação otimizada para produção do tijolo ecológico pode ser comercializada avaliando a resistência à flexão x período de cura.
- Após a análise de variância ANOVA, Shapiro-Wilk, Kruskal-Wallis e o teste T Pareado, concluiu-se que os corpos de prova da formulação F2 se sobressaiu dos demais exemplares, tendo a maior média de resistência e sendo estatisticamente diferente de outros 8 grupos.
- O resultado para o ensaio de resistência à flexão de 3 pontos apresenta bons resultados para os corpos de prova da formulação F2, esse mesmo resultado

também foi analisado pelo modelo matemático e pela análise estatística.

Por fim, pelos ensaios realizados tanto na matéria-prima como nos corpos de prova produzidos com as formulações F1(formulação padrão), F2, F3 e F4 pode-se concluir que a formulação F2 têm melhor qualidade estética e mecânica, também apresenta qualidade de absorção de água e durabilidade, sendo essa a melhor opção de moldagem para otimizar o processo de produção dos tijolos ecológicos observados neste trabalho.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante das condições em que esta pesquisa foi desenvolvida, há outros parâmetros que podem ainda ser analisados e estudados de maneira mais aprofundada para futuros trabalhos relacionados à fabricação de tijolo ecológico, como as sugeridas a seguir:

- Realizar um estudo da viabilidade econômica do uso de tijolo ecológico com adição da formulação encontrada neste estudo;
- Executar um estudo do conforto acústico do tijolo ecológico comparando ao o tijolo de cerâmica convencional.
- Testar os resultados da formulação F2 no tijolo ecológico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. Avaliação dos procedimentos não-convencionais de laboratório para determinação do comportamento mecânico e de durabilidade de materiais cerâmicos vermelhos. Campos dos Goytacazes, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8491: Tijolo solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinaçãoda resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilizaçãode prensa manual ou hidráulica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ALROMA. Máquinas para tijolos ecológicos. Disponível em: <http://www.alroma.com.br/tijolo-vantagens > Acesso em 09 de abril de 2021.

ABC – Associação Brasileira de Cerâmica. Informações Técnicas: Definição e Classificação. 2016a. Disponível em: Acesso em: 20 de nov. de 2020.

AMBROZEWICZ, P.H.L. Materiais de construção. São Paulo: PINI, 2012.

ANICER. Artigo “Segredos da Secagem e Queima”. Revista da ANICER, Ano 11, edição 53, agosto, 2008.

BASSANEZI, R. C. Ensino - aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia. 3. ed. São Paulo: Contexto, 2012.

BARBOSA, N. P., MATONNE, R., MESBAH, A. Blocos de Concreto de Terra: Uma Opção Interessante Para a Sustentabilidade da Construção. Anais do 44p Congresso Brasileiro de Concreto, Belo horizonte ñ MG. Disponível napágina eletrônica do SEBRAE ñ Biblioteca On Line, em http://www.biblioteca.sebrae.com.br/. 2002.

BEZERRA, M. J. Putnoki, J. C. Novo Bezerra Matemática, Editora Scipione, São Paulo, 1994.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção, 5ª edição revisada v.2 - Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2015.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6.Ed. Rio de Janeiro, Brasil.LTC,2008.

CARVALHO, R. S. de S. Estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Piauí, 2019.

CORTESE, T. T. P.; KNIESS, C. T. MACCARI, E. A., (orgs.). Cidades Inteligentes e Sustentáveis. 1 ed. São Paulo: Manole, 2017.

COUTO, V. M. P. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais Cerâmicos Derivados do Processamento dos Resíduos de Estação de Tratamento de Água. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências), UFRJ: Rio de Janeiro, 2011.

CONTADOR, J. C. Modelo para aumentar a competitividade da indústria brasileira de manufatura. Revista de Administração da Usp, São Paulo, v. 29, n. 4, p.3-12, out. 1994.

DETHIER, J. Arquiteturas de terra, ou o futuro de uma tradição milenar. Europa Terceiro Mundo – Estados Unidos. 10ed. Lisboa: Litografia Tejo, 1993.

DIAS, M. P. S. P. O processo produtivo na mineração de areia no rio Poti em Teresina – Piauí: um olhar para a saúde, o trabalho e o ambiente. Fortaleza, 105f, 2006.

DUAILIBI, J. F. Mercado de cerâmica vermelha estrutural. ABC Informativo, n.26,1999.

EMILIANI, G.P. & CORBARA, F. Tecnologia cerâmica. Faenza: Editoriale Faenza Editrice, v.1, 1999.

FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI, A. A. S. Estudo da Aplicação de Resíduo de Argamassa de Cimento nas Propriedades de Tijolos de Solo-Cimento. IlhaSolteira-SP, 2004.

FERREIRA, J. D.; ARAUJO, V. V. B. De; GASPARINI, V. A. A Importância da Qualidade nas Organizações. Revista de Ciências Jurídicas e Empresariais, v. 17, n. 1, p. 50-55, 2016.

FERREIRA, R. C. Desempenho físico-mecânico e propriedades termo físicas de tijolos e mini painéis de terra crua tratada com aditivos químicos. 204 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

FIGUEREDO, G. P. Propriedades físico-químicas de argilas e de zeólitas do Estado do Maranhão/ Gilvan Pereira Figueiredo. -São Luís, 143 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Química, UFMA, São Luís,2010.

FRAGA, Y. S. B. et al. *Tecnologia dos materiais: a utilização do tijolo de solo-cimento na construção civil.* Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT, v. 3, n. 3, p. 11. 2016.

GONÇALVES, C. P.; CARDOSO, A. F. A utilização da cerâmica nas técnicas construtivas em busca da inovação e sustentabilidade. In: 201 Congresso Brasileiro de Cerâmica 60º, Águas de Lindóia, São Paulo, p. 577 – 587, 2016.

GOMES, M. I.; BRITO, J.; LOPES, M. Construção de uma edificação em terra crua reforçada com pórticos em betão armado. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil, 2008.

HAGEMANN S.E. *Materiais de construção básicos.* Rio grande do Sul: Universidade

Aberta do Brasil, Instituto Federal Sul-Rio Grandense, 145 p, 2011.

HENRIQUES, P. M. Avaliação do tijolo modular de solo-cimento como material na construção civil. Escola Politécnica: Rio de Janeiro, 2009.
JEWETT JR., John W.; SERWAY, Raymond A. Física: para cientistas e engenheiros. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, xxiii, 412 p, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 3 ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

LUZ, A.B. & LINS, F.A.F. Areia Industrial. In: Rochas e minerais industriais - usos e especificações. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p. 103 - 123, 2008.

KLEIN, C. & HURLBUT, C.S. Manual of Mineralogy. After J.D. Dana, 21st Edition. John Wiley & Sons. 681 p, 1993.

MARQUES, J. C. Sistema de Gestão de Qualidade, 2013.

MARINONI, N. et al. Influence of aggregate mineralogy on alkali–silica reaction studied by X-ray powder diffraction and imaging techniques. J. Mater Sci. n° 47, p. 2845-2855, 2012.

MEIRA, R. C. As ferramentas para a melhoria da qualidade. Porto Alegre: SEBRAE, 2003.

MENDES, R.; ZANOTTI, R A. R.; MENEZES, J.C. S. S. Produção de Solo-Cimento (Tijolo Ecológico) Utilizando Resíduo do Polimento de Grés de Porcelanato como Fonte de Sílica. Revista de Engenharia Civil IMED, 1(1): 50-55- ISSN 2358-6508, 2014.

MOTTA, J. C. S. S., et al. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. *e-xacta* 7, p.13-26, 2014.

MORAIS, Marcelo Brito de; CHAVES, Armando Macêdo; JONES, Kimberly Marie. Análise de viabilidade de aplicação do tijolo ecológico na construção civil contemporânea. Revista Pensar Engenharia, v. 2, n. 2, jul. 2014.

OLIVEIRA, F. E. M. Acompanhamento da produção industrial em cerâmica da microrregião do Vale do Assu: estudo de caso. Angicos, RN: UFESA, 2011.

OLIVEIRA, R. F. V. Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos. Ouro Preto, 2011.

PECORIELLO, L. A.; BARROS, J. M. de C. Alvenarias de tijolo solo-cimento. Revista Téchne, São Paulo, n. 87, jun., 2004.

PISANI, M. A. J. Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. AE ensaios. 2010.

PISANI, M. A. J. Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. In: SINERGIA. v.6. n.1. São Paulo, 2005.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S. & STARLING, T. Materiais de Construção Civil. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 4ª edição, renovada, 2013.

ROTHER, M.; SHOOK, J. Aprendendo a Enxergar, São Paulo, Lean Institute Brasil, 2000.SANTANA, J.E.S.; CARVALHO, A.C.X.; FARIAS, R.A.P.G. Tijolo ecológico versus tijolo comum: Benefícios ambientais e economia da energia durante o processo de queima. In: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2013.

SAMPAIO, G. S.; NUNES, I. E. S. Estudo interdisciplinar da viabilidade de aplicação do tijolo de solo-cimento na construção civil: economia aliada à sustentabilidade. Faculdade Integradas Teresa D' Ávila – FATEA, 2017.

SILVA, S. R. Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco. 2005. 202 f.- Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2005.

SILVA, S. R. Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco. 2005. 202 f.- Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2005.

SILVA M. A. Modelagem Matemática: Equações diferenciais ordinárias em cursos de graduação. TCC - Licenciatura em Matemática, IFSP São Paulo 2014.

SOARES, R. A. L. Influência do teor de calcário no comportamento físico, mecânico e microestrutural de cerâmicas estruturais. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 100p,2008.

SOARES, R. A. L. Caracterização de uma argila contaminada com calcário: estudo da potencialidade de aplicação em massa de cerâmica de revestimento. Instituto Federação do Piauí - IFPI, Teresina, 2010.

SOUZA, M. I., PEREIRA, J. A.; SEGANTINI, A. A. S. Tijolos solo-cimento com resíduos de construção. Revista Téchne, São Paulo, n. 113, ago. 2006.

SOARES, R. A. L.; LINHARES, Z. J.& OLIVEIRA, Y.L. As argilas do setor cerâmico piauiense. 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica 18 a 21 de maio, Bento Gonçalves – RS, 2014.

SOARES, R. A. L.; SOARES R. A. L. & LIMA, Y. C. C. Avaliação do tijolo ecológico produzido em Teresina –PI. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica 15 a 18 de maio, Águas de Lindóia – SP, 2016.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISSON, A.; JOHNSTON, A. *Administração da Produção*. 3a Ed. Atlas. São Paulo, 2009.

TONDOLO, R. da R. P. et al. (2016). Gestão dos custos operacionais na empresa de pequeno-porte: um estudo de caso no sul do Brasil. Revista Espacios, v. 34, 2013.

XAVIER, G.C. Utilização de Resíduos da Serragem do Mármore e Granito na Confecção de Peças Cerâmicas Vermelhas. Tese de Doutorado, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2001.

ZARUR, G.D. Ensaio de Flexão de Corpos de Prova Cerâmicos em Estado de Entrega. Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Blumenau,2018.