



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

CLARA BENVINDA BARREIRA SOARES

**DESTINAÇÃO DE LODO DA ETA 06 – PALMAS NO PERÍODO DE ESTIAGEM
PARA PRODUÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO**

PALMAS

2022

CLARA BENVINDA BARREIRA SOARES

**DESTINAÇÃO DE LODO DA ETA 06 – PALMAS NO PERÍODO DE ESTIAGEM
PARA PRODUÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO**

Projeto de Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães
Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S676d Soares, Clara Benvinda Barreira
 DESTINAÇÃO DE LODO DA ETA 06 – PALMAS NO PERÍODO
 DE ESTIAGEM PARA PRODUÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO / Clara
 Benvinda Barreira Soares. – Palmas, TO, 2022.
 66 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva

1. TIJOLO ECOLÓGICO. 2. LODO DE ETA. 3. PROCESSO DE
PRODUÇÃO DE TIJOLOS COM LODO DE ETA. I. Silva, Giulliano
Guimarães. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

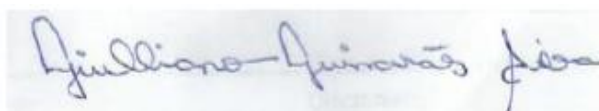
CLARA BENVINDA BARREIRA SOARES

**DESTINAÇÃO DE LODO DA ETA 06 – PALMAS NO PERÍODO DE ESTIAGEM
PARA PRODUÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Data de aprovação: 20 / 04 / 2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Giuliano Guimarães Silva
Orientador - IFTO



Prof. Me. Gabriel Antonio Ribeiro Souza
Examinador - IFTO



Prof. Me. Adriano dos Guimarães de Carvalho
Examinador - IFTO

DEDICATÓRIA

A minha família que sempre me apoiou,
meus pais, Albanita e Waterlot, e as
minhas irmãs, Atália e Mariana.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me guiado em toda minha caminhada, ter me dado saúde e forças para superar todas as dificuldades que passei durante minha jornada até aqui.

A esta instituição de ensino, seu corpo docente, direção e administração que me proporcionaram um ambiente agradável para os estudos e por todo suporte que me foi oferecido.

Ao meu orientador professor Dr. Giulliano Guimarães Silva, pelo suporte que me ofertou, correções e incentivos desde o início deste projeto.

Aos meus pais, pelo amor e incentivo, estes foram peças fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional.

A minha irmã Atália e meu cunhado André, por todo suporte e cuidado que recebi em nossos anos morando juntos.

Aos meus amigos e parceiros de curso, por toda ajuda e crescimento estando perto de vocês.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para que eu chegasse até aqui, minha eterna gratidão.

RESUMO

Todos os dias as cidades se expandem e com elas, aumentam as demandas de água potável, e assim como qualquer outro processo industrial, o tratamento da água para torná-la adequada ao consumo humano gera subprodutos/resíduos sendo que o principal deles é o lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). O presente estudo, tem como objetivo geral, avaliar a viabilidade técnica do Lodo de ETA da estação de tratamento de água de Palmas-Tocantins, por meio das análises físicas e mecânicas dos blocos, na incorporação como agregado para a fabricação de tijolos ecológicos. A motivação em realizar este estudo, se deu principalmente pelo fato de, atualmente, o lodo de ETA ser um resíduo com grande potencial de gerar impactos ao meio ambiente, mas com potencial para reaproveitamento em diferentes aplicações, dentre elas, a construção civil. O Estudo usou como método, a incorporação do lodo de ETA em diferentes concentrações para a fabricação de tijolos ecológicos de modo que foram produzidos 9 traços com porcentagens diferentes de lodo, solo e cimento, em que foram avaliadas as características destes relacionadas com a resistência à compressão simples e a absorção de água dos blocos, os resultados mostraram um traço adequado com as normas NBR 10836/94, NBR 8492/12 e NBR 8491/12, para blocos de vedação.

Palavras-Chave: Lodo de ETA. Reaproveitamento. Tijolos Ecológicos. Estação de Tratamento de Água. Construção Civil.

ABSTRACT

Every day cities expand and with them, increasing demands for drinking water, and just like any other industrial process, water treatment to make it suitable for human consumption generates by-products/waste the main one being the sludge from the Water Treatment Station (WTS). The present study has the general objective, to evaluate the technical feasibility of the ETA Sludge from the Palmas-Tocantins water treatment plant, through the physical and mechanical analysis of the blocks, incorporation as an aggregate for the manufacture of ecological bricks. The motivation for carrying out this study was mainly since, currently, WTS sludge is a waste with great potential to generate impacts on the environment, but with potential for reuse in different applications, amongst them, the civil construction. The study used as a method, the incorporation of WTS sludge in different concentrations for the manufacture of ecological bricks so that 9 traces were produced with different percentages of sludge, soil and cement, in which the characteristics of these related to the simple compressive strength and water absorption of the blocks were evaluated, the results showed that only one trace adequate with the standards NBR 10836/94, NBR 8492 /12 and NBR 8491/12, for sealing blocks.

Keywords: WTS sludge. reuse. Ecological Bricks. Water treatment station. Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de tratamento da água mais utilizado no Brasil	23
Figura 2 - % ETA com tratamento convencional no Brasil.....	27
Figura 3 - Padrão dos metais presentes no lodo de ETA	30
Figura 4 - Representação do espaço estatístico em um experimento DCCR, em dois níveis com três variáveis independentes.....	34
Figura 5 - Etapas do processo de coleta do lodo de ETA: a) Bags têxteis de armazenamento do lodo de ETA; b) Área onde foi realizado o rasgo para coleta; c) coleta do Lodo de ETA; d) Lodo de ETA já coletado e armazenado no laboratório do IFTO	36
Figura 6 - Representação das etapas de processamento do Lodo da ETA: a) Diâmetro do Lodo de ETA b) Lodo de ETA passando pelo britador no processo de obtenção do material finamente dividido.....	37
Figura 7 - Material processado manualmente na peneira circular	38
Figura 8 - (a) Agregado miúdo natural proveniente de rio; (b) Fotografia do saibro empregados na produção do bloco de solo-cimento	38
Figura 9 - Processo de mistura e homogeneização dos traços: a) Multiprocessador; b) Esteira que transporta o material até a prensa.	39
Figura 10 - Processo de fabricação prensagem e fabricação dos tijolos: a) Prensa Al Roma; b) Moldagem dos tijolos; c) Tijolos prontos.	39
Figura 11 - Tijolos acondicionados em paletes.....	41
Figura 12 - Tijolos armazenados para a cura	41
Figura 13 - Tijolos no IFTO	42
Figura 14 - Processo de preparação dos tijolos para o ensaio de resistência a compressão simples: a) Corte dos tijolos; b) Tijolos cortados aguardando a próxima etapa.....	43
Figura 15 - Preparo da pasta de cimento em mesa de vidro para o capeamento	44
Figura 16 - Corpos de prova no tanque aguardando imersão	45
Figura 17 - Máquina universal de ensaios modelo - 10.000	45
Figura 18 - Processo de preparação para o teste de absorção de água: a) Blocos em estufa a 100°C; Bloco imersos em água após a pesagem seca.....	46
Figura 19 - Variáveis e respostas do aplicativo	49

Figura 20 - Metodologia do aplicativo.....	48
Figura 21 - Projeto de Habitação para substituição de tijolos convencionais por tijolo com lodo de ETA	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços usados nos ensaios (Valores em kg)	39
Tabela 2 - Níveis codificados para o experimento DCCR.....	49
Tabela 3 - Análise delineamento fatorial - DCCR	53
Tabela 4 - Análise de variância dos resultados experimentais obtidos pelo modelo fatorial empregado na produção dos traços dos blocos de alvenaria de solo-cimento com lodo de ETA na composição.	53
Tabela 5 - Análise da regressão dos resultados experimentais obtidos pelo modelo fatorial empregado na produção dos traços dos blocos de alvenaria de solo-cimento com resíduos na sua composição.	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Gráfico de Resistência à compressão dos tijolos.....	51
Gráfico 2 - Gráfico de valores de absorção dos tijolos	51
Gráfico 3 - Gráfico de dispersão apresentando os valores preditos e experimentais de absorção de água dos blocos	53
Gráfico 4- Gráfico de Pareto para a análise a 95% de confiança das variáveis e suas interações a partir do modelo estatístico empregado para a análise da resistência dos blocos de alvenaria produzidos.	54
Gráfico 5 - Dispersão da tensão no primeiro cenário.....	55
Gráfico 6 - Superfície de resposta obtidas a partir da análise da resposta das composições Lodo e cimento em relação a sua resistência mecânica.....	56
Gráfico 7 - Análise DCCR entre Cimento e Lodo por absorção de água analisada ..	56
Gráfico 8 - Gráfico de Pareto para a análise a 95% de confiança das variáveis e suas interações a partir do modelo estatístico empregado para a análise da absorção de água nos blocos de alvenaria produzidos.	57
Gráfico 9 - Valores otimizados	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Função e descrição dos processos do tratamento convencional de água	28
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPV ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial
DCCR - Delineamento Experimental Composto Rotacionado
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ETA - Estações de Tratamento de Água
IFTO – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Tocantins
Mpa – Mega Pascal
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
pH - Potencial (ou potência) hidrogeniônico
PNMA - Política Nacional de Meio ambiente
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SISNAMA - Sistema Nacional de Meio Ambiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Problema Da Pesquisa.....	18
1.2 Justificativa	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1 AS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	21
3.2 ETAPAS DO TRATAMENTO DA ÁGUA NA ETA.....	22
3.2.1 Coagulação	23
3.2.2 Floculação.....	24
3.2.3 Sedimentação	25
3.2.4 Filtração	26
3.2.5 Desinfecção e fluoretação	26
3.3 GERAÇÃO RESÍDUOS NAS ETAS	27
3.4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	31
3.5 TIJOLOS ECOLÓGICOS	31
3.6 PLANEJAMENTO FATORIAL	32
4 METODOLOGIA	35
4.1 PROCESSAMENTO/REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INORGÂNICOS ..	35
4.1.1 Processamento do lodo de ETA.....	35
4.2 ENSAIOS FÍSICOS E QUÍMICOS: DO PROCESSAMENTO A FABRICAÇÃO ..	46
4.2.1 Ensaio de massa específica.....	47
4.2.2 Módulo de finura e dimensão máxima.....	47

4.2.3 Avaliação da resistência mecânica dos blocos de solo-cimento através de ensaios de compressão uniaxial	47
4.2.4 Avaliação da absorção de água nos blocos de alvenaria	48
4.3 PLANEJAMENTO FATORIAL DE DUAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES: A PARTIR DO DELINEAMENTO CENTRAL COMPOSTO ROTACIONADO (DCCR).48	
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1 A FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE ALVENARIA DE SOLO-CIMENTO E AS IMPLICAÇÕES DA SUBSTITUIÇÃO DO SOLO POR LODO DE ETA	51
5.1.1 Ensaio de resistência a compressão e absorção dos blocos	51
5.1.2 Fabricação de blocos de alvenaria através da substituição de solo por lodo de ETA: Planejamento Fatorial	53
5.1.3 Traços possíveis para os tijolos e a destinação dos mesmos.....	58
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, nas últimas décadas, tem sido registrado um substancial aumento no crescimento populacional e um processo de urbanização bastante intenso, e em decorrência disso, é preciso que haja organização e planejamento para dar à população boas condições de infraestrutura, paralelo a isso, há ainda o aumento da demanda por bens e consumo, por tecnologias e pelo uso de energia e água, e todas essas demandas, são responsáveis pela geração de grandes impactos ao meio ambiente.

O principal exemplo dos impactos negativos ao meio ambiente, refere-se a produção de resíduos sólidos, e o crescimento das cidades, bem como a exigência de uma melhor qualidade de vida tem demandado o aumento de água potável ao mesmo tempo que existe uma enorme carência relacionadas com a gestão de políticas públicas e de consciência ambiental relacionadas com o uso de água, de modo que, o aumento demográfico, tem contribuído para a degradação da qualidade da água, criando a necessidade de tratamentos mais complexos que sejam capazes de alcançar os padrões mínimos de potabilidade (AHMAD *et al.*, 2016).

Desse modo, essa maior exigência nos padrões de potabilidade, resulta em uma maior exigência nas concentrações de produtos químicos nos processos de tratamento, elevando assim a geração de resíduos nas estações de tratamento de água (ETA), uma vez que estas, possuem como principal finalidade, a transformação da água bruta em água potável, e dentre os principais resíduos gerados, está o Lodo de ETA.

O planejamento e gestão desses resíduos produzidos nas estações de tratamento de água, que é em geral apresentado em forma de lodo (Lodo de ETA) é uma grande dificuldade para cientistas e engenheiros ambientais, seu gerenciamento e descarte ambientalmente correto é uma tarefa desafiadora.

Isso porque, além do impacto gerado para o meio ambiente, os Lodos de ETA podem gerar riscos para a saúde humana em decorrência da presença de diversos agentes patogênicos e metais pesados, destacando-se assim a importância da correta destinação ou o correto reaproveitamento desses resíduos.

Diante disso, a construção civil é uma das áreas da indústria que possui bastante interesse no aproveitamento de resíduos, e em relação ao Lodo de ETA, é possível a realização da reciclagem do mesmo como auxílio a produção de tijolos

ecológicos, dando para o lodo um destino final eficiente e útil (DE SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2017).

Sendo assim, o estudo visará principalmente, a destinação do lodo gerado pela ETA – 06 de Palmas para a produção de tijolos ecológicos.

1.1 Problema Da Pesquisa

Virtualmente, todos os sistemas de processamento de água potável conhecidos geram uma enorme quantidade de lodo residual, e o que fazer com esse fluxo de “resíduos” que aumenta rapidamente de maneira econômica e ambientalmente sustentável continua sendo uma questão ambiental significativa.

Talvez a compreensão desse fato tenha levado a uma série de esforços combinados voltados para reutilizações benéficas em um esforço para fechar o ciclo entre o tratamento eficiente da água e o gerenciamento sustentável do lodo. Com base nisso, o presente trabalho buscará responder a seguinte questão problema:

O Lodo da Estação de Tratamento de Água de Palmas-TO (ETA-06) produzido durante o período da estiagem (abril-outubro) possui características físico-químicas adequadas para a fabricação de tijolos ecológicos?

1.2 Justificativa

De acordo com a Norma Brasileira (NBR) nº 10.004 (ABNT, 2004) o Lodo de ETA, é classificado como um resíduo sólido e deve ser tratado e disposto de acordo com as exigências dos órgãos de regulamentação atendendo à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) regulamentada pela Lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), de modo com que as empresas de saneamento e indústrias do setor, sejam capazes de buscar soluções ambientalmente corretas para a destinação dos resíduos que são gerados nos processos de tratamento de água.

Carneiro e Andreoli (2013) destacam que a composição dos Lodos de ETA, variam e estão relacionadas diretamente com o tipo e com a qualidade dos mananciais usados para a captação ou mesmo, pode apresentar diferentes substâncias em concentrações variadas em decorrência dos aspectos que são inerentes à bacia

hidrográfica, e está também diretamente condicionada com o uso e a ocupação do solo, as condições climáticas e ao tipo de coagulante que é usado para o tratamento da água.

Conforme indicado por Januário (2007) durante os períodos chuvosos, a qualidade da água dos mananciais pode ser prejudicada, demandando ainda mais produtos coagulantes para o tratamento da mesma, e consequentemente gerando uma quantidade maior de lodo, entretanto, nos períodos de estiagem, que conforme Mendes (2019) na cidade de Palmas-TO ocorre entre os meses de abril a outubro, há uma redução da necessidade desses produtos, e acredita-se que consequentemente uma produção reduzida de lodo de ETA.

Assim, a justificativa do estudo, está em avaliar as características físico-químicas do lodo de tratamento de água e sua possível aplicação para a fabricação de tijolos ecológicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica do Lodo de ETA da estação de tratamento de água de Palmas Tocantins, por meio das análises físicas e mecânicas dos blocos, na incorporação como agregado para a fabricação de tijolos ecológicos.

2.2 Objetivos Específicos

1. Analisar as características físico-químicas do Lodo de ETA;
2. Formular um traço de solo, cimento e Lodo de ETA, por meio de planejamento experimental que utilize menos cimento e mais Lodo que seja capaz de produzir tijolos de vedação com resistência mecânica à compressão de 2,0 MPa;
3. Verificar as diferentes formas de tratamento de Lodos;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 AS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

As Estações de Tratamento de Água (ETA) são um conjunto de equipamentos e de instalações que são destinadas para a realização do tratamento de água bruta. E, de acordo com Fernandes (2014) sendo a água um bem essencial para a sobrevivência humana, no decorrer da história, ela sempre teve um lugar de destaque.

Entretanto, Reymão e Saber (2009) destacam que, em virtude do crescimento demográfico, do processo de urbanização e da expansão da agricultura, a água do planeta tende à escassez, e isso tem gerado um aumento da disputa por esse recurso tão essencial assim como tem gerado uma crise de abastecimento com dimensões globais.

Mendes e Coelho (2007) atribuem o problema da qualidade da água ao desenvolvimento econômico, sobretudo nos países em desenvolvimento, pois, o crescimento industrial ainda está em andamento nesses países e o cuidado com o meio ambiente e com a água muitas vezes é deixado em segundo plano, e os resíduos industriais são lançados no meio ambiente sem qualquer tipo de tratamento prévio.

Souza et al. (2014) ao pensarem sobre o uso de água para o consumo humano, colocam que a qualidade é um aspecto indispensável, e é justamente por isso que o seu uso tem sofrido constantes restrições em razão dos prejuízos que as ações tanto humanas quanto naturais têm causado nos corpos hídricos que abastecem os centros urbanos.

Ainda conforme Souza et al. (2014) a água possui a sua importância relacionada não apenas com as suas funções para a natureza, ela representa um importante papel para a saúde, a economia e sobretudo para a qualidade de vida das pessoas. De um modo que é possível dizer que a água exerce um importante papel social e cultural, pois, garante o crescimento das populações.

Para isso, existem no Brasil as leis que asseguram o uso sustentável e a proteção dos recursos hídricos, e a principal delas, é a Lei Federal nº 9.433 de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, tal lei assegura para toda população, seja a atual ou a futura, a disponibilidade de água com padrões de qualidade adequado.

Desse modo, Bongiovani *et al.* (2010) destaca que a preocupação em cuidar da água é recorrente em todas as esferas científicas e governamentais, pois, além de ser um bem econômico usada na agricultura, na indústria e na pecuária, é considerada uma importante fonte de abastecimento para o consumo humano, e por isso, o tratamento adequado é essencial.

Conforme Souza *et al.* (2014) colocam que a estação de tratamento é uma unidade do sistema de abastecimento de água que é responsável por enquadrar a água que será fornecida para a população aos padrões de potabilidade e salubridade, e trata-se de uma sequência de operações que consistem no melhoramento das características organolépticas, físicas, químicas e bacteriológicas a fim de que ela se torne apropriada para o consumo.

Dessa forma, a qualidade da água, mais que o suprimento da demanda biológica humana e da natureza, ela está envolvida com a preocupação em manter o bem-estar saudável das populações e das comunidades, e para a garantia de que a água esteja dentro dos parâmetros de potabilidade e salubridade, é preciso que seja realizado o tratamento na Estação de Tratamento de água (ETA) com a finalidade de reduzir o excesso de impurezas, a redução dos teores elevados de compostos orgânicos, como por exemplo algas, bactérias, protozoários, e o tratamento serve também para eliminar ou reduzir substâncias tóxicas ou nocivas.

Conforme indicado por Libânio (2010) o tratamento de água, consiste em um processo de remoção de substâncias presentes na água que são prejudiciais à saúde humana como as partículas suspensa e coloidais, materiais orgânicos e microrganismos, com vistas ao menor custo de implantação, de manutenção e de operação e que gere o menor impacto possível ao meio ambiente.

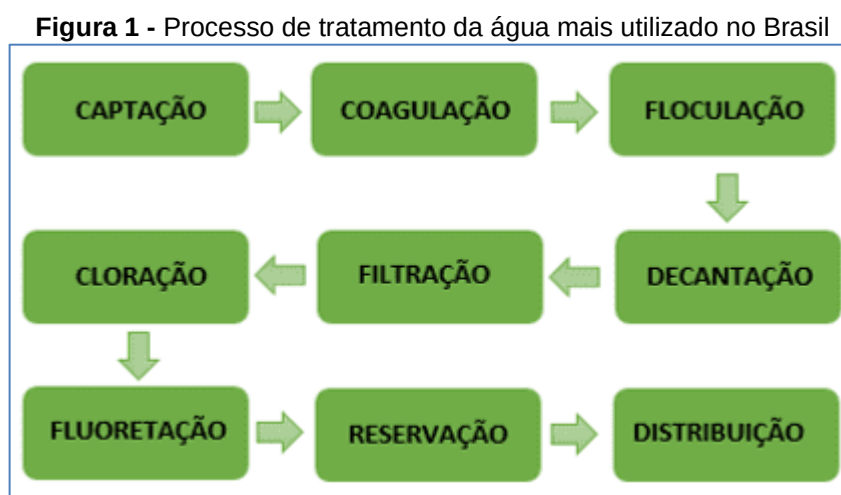
A Estação de Tratamento de água de Palmas a ETA 06 é uma ETA de ciclo completo, que atualmente passa por obras ampliação de sua capacidade de produção de 750 litros de água tratada por segundo para 1500 litros por segundo. O manancial de captação de água bruta é o Ribeirão Taquarussu.

3.2 ETAPAS DO TRATAMENTO DA ÁGUA NA ETA

De acordo com Rodrigues (2012) o tratamento de água possui uma grande importância para a sociedade e para a economia e é realizado com vários fins. Assim,

ainda conforme o autor, o tratamento de água é feito com fins higiênicos de modo que garanta a remoção das impurezas e dos altos teores de compostos orgânicos; para fins estéticos, promovendo a melhoria do sabor, odor e turbidez; e, para fins econômicos, com vistas à eliminação dos elementos químicos presentes na água.

De acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2021) o processo de tratamento mais usado no Brasil, é representado pela Figura 1 abaixo:



Fonte: Sabesp (2016)

Ainda conforme Libânio (2010) o processo de tratamento de água pode ser dividido em três fases e são elas, a clarificação, a filtração e a desinfecção, sendo que, ao processo de clarificação, compete as etapas de coagulação, floculação e decantação ou de flotação, visando a remoção de sólidos suspensos e parte dos sólidos dissolvidos, na etapa de filtração, objetiva-se a remoção de sólidos dissolvidos e de microrganismos e, na etapa final que é a desinfecção, ocorre a inativação dos microrganismos que ainda estejam presentes na água como por exemplo vírus ou bactérias. As etapas de tratamento da água serão descritas a seguir:

3.2.1 Coagulação

Conforme Cunha e Miranda (2015) o processo de coagulação usa espécies químicas que desestabilizam as partículas de impurezas presentes na água, e consiste em adição de coagulantes, promovendo o aumento das mesmas e facilitando o processo de floculação.

Assim, conforme Freitas (2011) o processo de coagulação faz com que as substâncias presentes na água se aglomerem em forma de substâncias finas, em partículas que apresentam diâmetro a partir de 10^{-5} cm e suspensão coloidal com partículas que apresentam diâmetro a partir de 10^{-5} cm e 10^{-7} , para que sejam removidas nas etapas de decantação e filtração.

Ainda conforme Freitas (2011) os principais agentes coagulantes usados nesta etapa são o Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), o Sulfato Ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), o Sulfato Férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ou $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) e o Cloreto Férrico (FeCl_3 ou $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Di Bernardo *et al.* (2005) aponta que esse é um processo muito rápido, e é realizado dentro da estação de tratamento de água, na unidade de mistura rápida, e para a realização desse processo, considera-se as características da água e as substâncias presentes na mesma, que são conhecidas tanto pelos parâmetros de pH, quanto pela cor verdadeira, pela alcalinidade, pela turbidez, pela condutividade elétrica, pelo potencial zeta, pelo tamanho e distribuição das partículas em suspensão ou pelo estado coloidal da mesma.

Nunes (2012) destaca que o processo de coagulação ocorre pela mistura dos coagulantes à água provocando a hidrolisação, a polimerização e as relações com a alcalinidade. E, após a desestabilização das partículas, há a floculação.

3.2.2 Floculação

Libânio (2010) destaca que a floculação está intrinsecamente relacionada à coagulação. Esse é um processo que ocorre subsequente à coagulação, e nesse processo, o efluente é direcionado a um tanque de mistura lenta que tem como objetivo fazer a aglomeração das partículas já desestabilizadas na etapa anterior.

Cunha e Miranda (2015) completam que nessa etapa, não há a remoção de partículas, pois, a única finalidade é acondicionar a água e posteriormente enviá-la para os sedimentadores. Nesse sentido, o processo de floculação consiste em dois mecanismos complementares, o primeiro deles é a adesão, e o segundo é o transporte, onde, a adesão é relacionada com as cargas superficiais das partículas que já sofreram alterações durante a coagulação e o transporte, consiste na agitação

que é induzida ao meio, movimento esse que pode ser dividido em fluído, Browniano e em sedimentação diferencial.

Conforme indicado por Nunes (2012) para que haja formação de flocos grandes e com densidade para uma sedimentação eficiente, o tempo de agitação nos tanques de floculação deve ser de pelo menos 30 minutos, e isso só ocorre, quando a dosagem correta de coagulante é usada, e também depende diretamente do tipo de coagulante que é usado, de modo que, a eficiência dos processos de coagulação e de floculação é avaliada tanto pelo consumo do coagulante, quanto pela turbidez da água após o processo.

3.2.3 Sedimentação

Conforme Libânio (2010) a sedimentação é uma etapa conhecida também como decantação, e é a penúltima etapa do tratamento de água e também a etapa mais comum do mesmo, consiste na remoção das partículas em suspensão pelo uso da força da gravidade, uma vez que, as partículas se separam por apresentar uma densidade que é superior à água.

Dessa forma, tanto a decantação quanto a flotação, são processos unitários que de modo geral, refletem a eficiência das etapas anteriores, uma vez que, os flocos que são formados nas mesmas devem receber as condições que lhes permitirão o depósito pela ação da gravidade.

Cunha e Miranda (2015) destacam que a sedimentação tem como vantagem o menor custo de operação, por ser precedida das etapas de coagulação e floculação, mas, não é um procedimento capaz de remover as impurezas que estejam contidas nas águas naturais que se apresentam em estado coloidal. Isso porque, as partículas primeiramente precisam passar por processo que provoque a aglomeração formando flocos com densidade maior que a água que permita o depósito na parte inferior do decantador.

Conforme Nunes (2012) quando os sólidos sedimentados são em quantidade e tamanho consideráveis e podem ser removidos em os processos de decantação, ela é considerada como primária ou simples, e, as partículas que não podem ser removidas com a sedimentação, por conta do tamanho, são removidas pelo processo de filtração.

3.2.4 Filtração

A filtração, conforme Libânio (2010), é o processo pelo qual ocorre a remoção das partículas que são responsáveis pela cor e pela turbidez da água, uma vez que a presença dessas partículas, é capaz de afetar a eficiência da desinfecção no que diz respeito à inativação dos microrganismos patogênicos.

Assim, ainda conforme o mesmo autor supracitado, nas estações de tratamento de água, a filtração é uma das etapas mais relevantes do processo, pois, é uma etapa capaz sobretudo de corrigir possíveis falhas nas etapas anteriores do tratamento, e a filtração é o processo que assegura a qualidade da água que está sendo tratada.

Macêdo (2007) complementa que a filtração é uma etapa que consiste em fazer com que a água atravesse uma camada de material poroso em que há a remoção dos materiais particulados em suspensão conforme o diâmetro dos poros, separando líquido de sólido.

Para Di Bernardo (2005) o objetivo da filtração é a remoção de partículas impuras da água pela passagem em um meio poroso, e é o resultado da ação de três mecanismos, e são eles o transporte, a aderência e o desprendimento.

3.2.5 Desinfecção e fluoretação

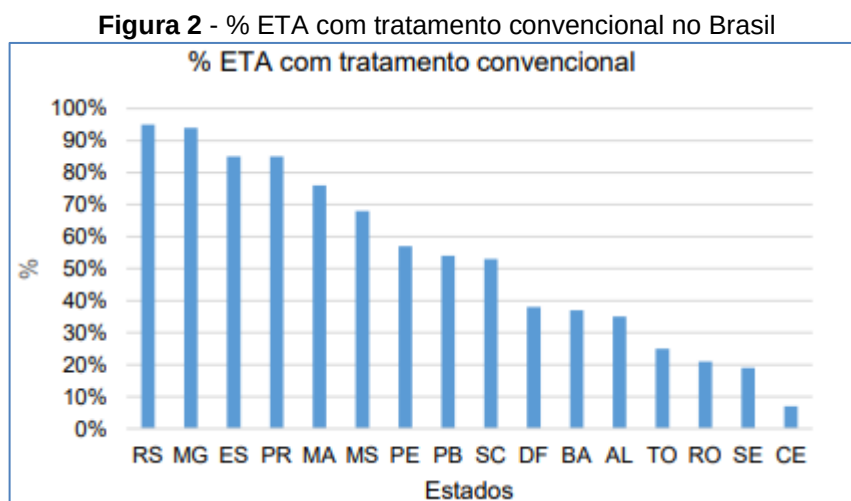
Conforme Souza *et al.* (2014) após a etapa de filtração, a água recebe a adição de cal para a correção do pH, a desinfecção por cloro e também a fluoretação, a desinfecção, consiste em um processo que elimina os microrganismos patogênicos da água, tornando-a própria para o consumo. Em geral, são usados para o abastecimento público de água, agentes desinfetantes como o cloro, a ozona, a luz ultravioleta e íons de prata.

No processo de fluoretação, o flúor é adicionado à água e tem como objetivo, agir de forma preventiva ao desgaste do esmalte dos dentes, conforme indica Pádua (2019), e em geral a dosagem média é de 0,8mg/L conforme a temperatura do local.

Todas as etapas do processo de tratamento de água devem seguir conforme a Portaria N°888 de 4 de maio de 2021 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

3.3 GERAÇÃO RESÍDUOS NAS ETAS

Conforme Libânio (2010) o tratamento convencional, é o mais usado nas estações de tratamento de água. Nesse sentido, o gráfico apresentado pelo autor, mostra a porcentagem das ETAs que são operadas por companhias que usam essa mesma tecnologia:



Fonte: Libânio, 2010.

De acordo com Andreoli *et al.* (2006) as Estações de Tratamento de Água (ETAs) de ciclo completo, ou seja, as ETAs de tratamento convencional que usam os processos de coagulação, floculação, clarificação por decantação ou por flotação, a filtração e a desinfecção, junto aos produtos químicos que são empregados para a remoção da cor e da turbidez da água bruta, geram resíduos nos tanques de sedimentação ou flotação e nos filtros.

Desse modo, considerando que o objetivo principal das Estações de Tratamento de Água para o abastecimento público deve ser a produção de uma água que seja biológica e quimicamente segura para o consumo humano, os vários processos e operações com a introdução de produtos químicos para a transformação da água bruta geram uma quantidade enorme de resíduos (DA CUNHA *et al.*, 2019).

Como já mencionados, as etapas de coagulação e de floculação, consistem na aplicação de coagulantes para desestabilizar as suspensões coloidais e permitir que as partículas sólidas se agreguem em flocos de modo que sejam capazes de gerar a sedimentação, e o resultado desse processo, acumula-se nas unidades de decantação, de flotação ou nos filtros em forma de lodo.

Dessa forma, a Quadro 1 a seguir, mostra a função, a descrição e as entradas e as saídas de cada uma das etapas do processo de tratamento convencional em uma ETA, de modo que, por entrada, entende-se a adição dos produtos à água que é feita em cada uma das etapas, e por saída, entende-se os subprodutos gerados pelo tratamento em cada uma das etapas.

Quadro 1 - Função e descrição dos processos do tratamento convencional de água

Etapa	Função	Descrição	Entrada	Saída
Coagulação	Neutraliza as cargas coloidais e reduz as forças que mantêm as partículas em suspensão afastadas	O coagulante é adicionado à água com alto grau de agitação e baixo tempo de detenção	Coagulante	-
Floculação	Formar flocos aumentando o diâmetro e o peso das partículas em suspensão	São estabelecidas as condições de tempo de detenção e grau de agitação para que o contato entre as partículas ocorra	Produto floculante	-
Sedimentação e decantação	Retira as partículas sólidas que estão em suspensão na água e reduz o afluxo de partículas para os filtros	As condições de tempo de detenção e grau de agitação são fornecidas para que os flocos possam se depositar a partir da ação da gravidade, da força de empuxo e do atrito		Lodo de ETA
Flotação	As partículas sólidas são retiradas reduzindo a quantidade de partículas para a filtração	É feita a injeção de ar na camada inferior da água para os flocos flutuarem para serem retirados na camada superior	-	Lodo de ETA
Filtração	As partículas pequenas são retiradas da água	Há a separação entre líquidos e sólidos pela passagem da água em um filtrante	-	Lodo de ETA
Desinfecção	Ocorre e inativação de microrganismos patogênicos e é feita a prevenção da proliferação microbiológica nas redes de distribuição	É adicionado o agente químico oxidante	Normalmente é adicionado o cloro	-
Fluoretação	É realizada a adequação da concentração de fluoreto à água	Adicionados compostos de flúor à água	Flúor	-
Correção de pH	O pH da água é corrigido para a redução da sua corrosividade, de modo que sejam evitados danos à tubulação da rede de distribuição	É aplicada a Cal hidratada	Cal hidratada	-

Fonte: Adaptado de Libânio (2010).

Verifica-se que as etapas de sedimentação, flotação e filtração, são as responsáveis pela geração do resíduo do lodo. E, Richter (2009) destaca que a

quantidade de lodo que é gerada, depende diretamente das características físico-químicas e dos parâmetros de cor e turbidez da água bruta, bem como também da eficiência das etapas do processo de tratamento da água e do tipo de coagulante e demais substâncias químicas que são usadas no tratamento.

De acordo com Cordeiro (2001) apontam ainda que, a taxa de geração do lodo é influenciada também pelo tempo de permanência nos tanques, pelas técnicas de tratamento e limpeza que é empregada, assim como também pela forma de descarga e pela quantidade de água que é usada na limpeza dos tanques, mas, em geral, em termos de massa a quantidade de lodo acumulada nos decantadores e nos flotadores costuma representar cerca de 60 a 95% do total formado, e o restante, provém da lavagem dos filtros.

Em geral, as características dos lodos de ETAs são diferentes, uma vez que como já mencionado, são influenciados pelas características das águas brutas e pelos produtos químicos que são usados e pela forma com que a limpeza dos decantadores e dos filtros é realizada.

Conforme Di Bernardo *et al.* (2012) no final do processo de tratamento da ETA, é apresentado um lodo de características não newtonianas, com grande volume e quantidade e que em estado de repouso possui um caráter gelatinoso e ligeiramente líquido quando agitado, o lodo que é originado pelos decantadores após passarem pelo processo de limpeza, possui uma alta densidade sólida e o lodo proveniente da limpeza dos filtros apresenta uma concentração de sólidos menor.

Conforme a adequação da Norma ABNT NBR nº 10.004 de 2004, os resíduos de lodo da ETA são caracterizados como sólidos e semi-sólidos, e a essa classificação, incluem-se todos os lodos que são gerados pelos equipamentos e instalações, e ainda, são resíduos classificados como resíduos de Classe A – não inertes, ou seja, se tratam de resíduos que não podem ser dispensados na natureza sem tratamento prévio (ABNT, 2004).

Fonollosa *et al.* (2015) e Richter (2009) apontam que os lodos de ETA em geral apresentam valores que variam em até 4% do teor de sólidos, entre 75 a 90% de sólidos suspensos e entre 20 a 35% de compostos voláteis, e apresentam também hidróxidos de metais provenientes dos coagulantes que são usados, e, ainda segundo os autores, são encontrados sais diversos, substâncias orgânicas e inorgânicas.

O Ministério de Meio Ambiente (BRASIL, 2011), por meio da Resolução de nº 430 de 2011 do CONAMA, determina os valores máximos que são permitidos de

metais presentes no lodo de ETA e tem como destino os efluentes, e tais valores são apresentados na Figura 3 a seguir:

Figura 3 - Padrão dos metais presentes no lodo de ETA

Metais	Valor máximo
Arsênio	0,5mg/L As
Cádmio total	0,2mg/Cd
Chumbo total	0,5mg/Pb
Cobre dissolvido	1,0mg/L Cu
Cromo hexavalente	0,1mg/L Cr ⁶
Cromo trivalente	1,0mg/L Cr ³
Estanho total	4,0mg/L Sn
Ferro dissolvido	15,0mg/L Fe
Manganês dissolvido	1,0mg/L Mn
Mercurio total	0,01mg/L Hg
Níquel total	2,0mg/L Ni
Prata total	0,1mg/L Ag
Selênio total	0,30mg/L Se
Zinco total	5,0mg/L Zn

Fonte: Brasil, 2011.

Fernandes *et al.* (2014) aponta que o Cádmio é capaz de causar efeitos indesejados ao meio ambiente, podendo afetar os seres humanos, os animais e as plantas e após absorvidos, podem ser encontrados nas células sanguíneas, e ainda pode se acumular nas estruturas orgânicas de plantas e nos organismos dos animais e pode afetar os seres humanos através da alimentação, acumulando-se no fígado e nos rins.

Moreira e Moreira (2013) destacam que o chumbo por sua vez, é um dos principais contaminantes ambientais, por ser um material comum e mais tóxico para os seres vivos, e, ao se acumular no organismo, o chumbo é capaz de formar ligações covalentes dos grupos sulfídricos, aminos e carboxílicos.

Em relação ao nível de toxicidade do alumínio, Echart *et al.* (2001) destacam que é capaz de limitar o desenvolvimento de plantas. Em relação ao mercúrio, Lima e Merçon (2011) aponta que ao se depositar em corpos de água se convertem em uma neurotoxina que se acumula no tecido adiposo.

3.4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

No Brasil, existe a legislação aplicada apenas aos assuntos que envolvem o Meio Ambiente, o Sistema Nacional de Meio Ambiente - Sisnama, é instituído pela Política Nacional de Meio ambiente (PNMA) a partir da Lei nº 6.938 de 1981, promovendo ações para a gestão do meio ambiente no país e é formado pelos órgãos e pelas entidades da União que se encarregam da proteção, da melhoria e da recuperação da qualidade ambiental, objetivando que o poluidor se responsabilize pela recuperação dos danos ambientais causados e ainda a obrigação de elaboração de estudos e relatórios dos impactos ambientais (BRASIL, 1981).

Nesse mesmo contexto, há a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que é regida pela Lei de nº 12.305 de 2010, regulamentando o incentivo para a não geração, para a redução e para a reutilização e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a destinação correta deles.

Em termos gerais, os resíduos sólidos são tudo aquilo que tem todas as alternativas findadas para o tratamento e para a recuperação através dos processos tecnológicos e viáveis financeiramente, e a partir da não obtenção de outras viabilidades não apresentam outra finalidade que não seja a destinação adequada para o meio ambiente (BRASIL, 2010).

A PNRS, sugere o reaproveitamento dos resíduos com a finalidade de minimizar os impactos ambientais, de modo que seja fornecida uma matéria prima de longo prazo e de baixo custo.

3.5 TIJOLOS ECOLÓGICOS

Conforme Fiais e Souza (2017) os tijolos em que em seu processo de fabricação são usados métodos que não necessitam seu processamento por queima como ocorre com os tijolos convencionais, são denominados de tijolos ecológicos, isso porque, o tipo de processamento usado para a fabricação dos mesmos demanda uma menor quantidade de água e reduz a quantidade de gases que são lançados no Meio Ambiente.

Nesse sentido, o tijolo ecológico possui características que podem ser essenciais para dar segmento ao modelo sustentável, principalmente considerando

que, a construção civil é uma das principais responsáveis pelos altos índices de geração de resíduos e de emissão de poluentes que causam danos graves tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana, danos esses que podem até ser irreversíveis (SOARES, 2017).

Em seus processos de fabricação, os tijolos ecológicos usam solo, ou mesmo reutilizam materiais derivados tanto da construção quanto de outros processos industriais, ou ainda, resíduos do próprio material, o que torna os tijolos modulares de solo-cimento como um material de ótima qualidade e ainda autossustentável (GONÇALVES e CARDOSO, 2016).

Isso porque, os tijolos ecológicos, ou tijolos de solo-cimento, possuem uma composição de solo, de cimento Portland e adição de uma pequena quantidade de água para a homogeneização da mistura, além de que, pode-se ainda fazer uso de diversos outros materiais para compor os tijolos, materiais esses que em geral, são descartados de forma incorreta no meio ambiente, dando para eles um uso amigável ambientalmente.

Nesse sentido, Ribeiro (2013) afirma que os tijolos solo-cimento podem possuir uma composição sujeita ao uso de materiais alternativos como por exemplo, vidros, borrachas, plásticos, resíduos de demolição, resíduos de mineração, de estações de tratamento de água e de esgoto, entre outros materiais.

Assim, a denominação de tijolo ecológico é dada por ser um material considerado ecologicamente correto, além disso, a forma com que o material é prensado, lhe dá uma característica física que permite que tubulações elétricas e hidráulicas perpassem o interior do material, contribuindo significativamente para a redução da geração de resíduos na obra (CASTRO; SILVA, 2011).

Além disso, Motta et al. (2014) afirma que o próprio material dos tijolos ecológicos pode ser reaproveitado, o que representa uma redução ainda maior na geração de resíduos da construção civil.

3.6 PLANEJAMENTO FATORIAL

O estudo em questão, propõe o desenvolvimento de um bloco de alvenaria solo-cimento obtido a partir da substituição de solo por resíduo de lodo de ETA, além de cimento e água. Para isso, escolheu-se usar como abordagem o planejamento

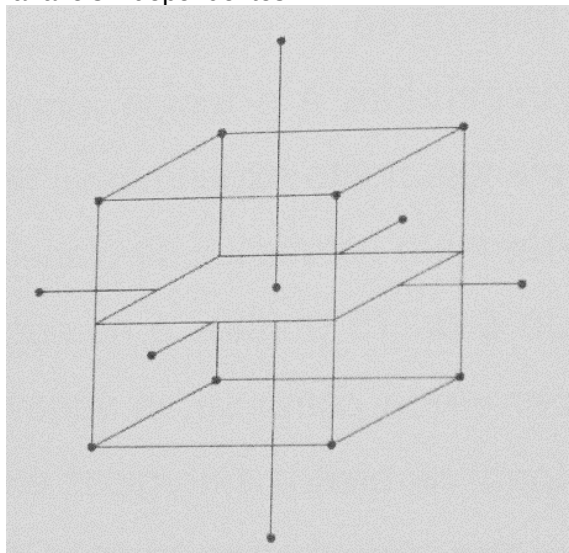
fatorial, de modo que seja possível a avaliação de superfícies de respostas dos experimentos que contemplem os efeitos de uma variável sobre o resultado de uma propriedade que se tem interesse em estudar, e ainda aspectos sinérgicos ou antagônicos produzidos pela sua interação.

Rodrigues e lemma (2006) apontam então, que esses resultados podem ser analisados com base em figuras de mérito, que são geradas a partir do conjunto de experimentos, provenientes do processo de otimização. Dessa forma, é uma ferramenta mais apropriada que as com base em empirismo ou métodos de tentativa e erro usadas para a análise de variáveis. Assim, usar essa ferramenta, permite avanços significativos na pesquisa, uma vez que reflete sobre os custos de produção, sobre o tempo de processo, sobre o rendimento e a qualidade dos produtos.

O presente estudo, ao longo do seu desenvolvimento experimentou essa mudança metodológica. Em uma primeira fase foi realizado o estudo da literatura do tema, analisando trabalhos já existentes, que estudaram a substituição do solo por resíduos de forma "*one-at-a-time*", ou seja, o estudo de uma variável por vez mantendo as condições fixas para as outras variáveis do processo.

No entanto, permitiram estabelecer intervalos de variação para as substituições de materiais nos blocos de alvenaria. Com isso, esse esforço pode ser aproveitado para a formulação de composições de novos blocos, a serem estudados a partir de uma tabela de níveis codificados, em estudos envolvendo o planejamento estatístico ou planejamento experimental fatorial (GONTIJO NETO, 2018).

Figura 4 - Representação do espaço estatístico em um experimento DCCR, em dois níveis com três variáveis independentes.



Fonte: RODRIGUES; IEMMA (2006).

O delineamento DCCR, baseia-se em planejamento fatorial completo, pois, a depender dos resultados estatísticos preditos pelo modelo ANOVA, torna-se possível ter acesso a um modelo paramétrico que permite analisar a interação entre as suas variáveis dentro de um limite de significância estabelecido, normalmente adotado em 5%. Isso permite a interpretação do gráfico de Pareto e também das figuras de mérito a partir das superfícies de respostas obtidas (RODRIGUES, 2006).

De acordo com Gontijo (2018) a adoção dessa estratégia, todavia é consoante a experiência adquirida no desenvolvimento dos processos de produção dos corpos de prova, que nesse caso são os próprios blocos de alvenaria. Os parâmetros investigados a partir do processamento dos materiais empregados no processo, bem como a experiência adquirida do desenvolvimento de etapas anteriores no processo e o bom senso, permitiram a criação de um cenário propício a otimização das variáveis e à criação das superfícies de respostas (GONTIJO NETO, 2018).

4 METODOLOGIA

O estudo se trata de uma pesquisa aplicada, onde, por meio de experimentos controlados buscou-se estudar o efeito da substituição parcial de solo arenoso em blocos solo-cimento de alvenaria pelo resíduo inorgânico lodo de ETA. A pesquisa foi desenvolvida em duas fases, em que a primeira delas compreendeu estudos exploratórios para a compreensão do problema levantado e para o levantamento de um referencial teórico para a segunda etapa da pesquisa que foi a etapa experimental de substituição de solo por lodo de ETA para a fabricação de tijolos ecológicos.

Para os experimentos, a pesquisa adotou uma abordagem quantitativa, visando a formulação de uma composição de materiais para produção de um bloco de alvenaria com características adequadas a construção civil. A análise quantitativa encontra-se amparada em análise estatística. A análise estatística dos resultados foi obtida a partir de um delineamento experimental composto rotacionado (DCCR) para 2 variáveis (RODRIGUES e IEMMA, 2006).

4.1 PROCESSAMENTO/REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INORGÂNICOS

Os materiais usados nos experimentos, foram adquiridos através de doação, cooperação técnica e compra direta. O lodo de ETA foi doado pela empresa BRK Ambiental, que é responsável pela gestão da ETA-6 de Palmas-TO. O cimento foi adquirido por meio de recursos próprios.

Os materiais doados que foram empregados no estudo, passaram pelas etapas de processamento, com o objetivo de adequá-los ao estudo, onde, basicamente, buscou-se a diminuição e o controle do tamanho das partículas.

4.1.1 Processamento do lodo de ETA

O lodo de ETA, foi coletado na ETA-6 gerida pela empresa BRK Ambiental. É a empresa responsável por distribuir a água tratada para toda a cidade de Palmas. O lodo foi coletado diretamente nos bags geotêxtis onde ficam retidos (Figura 6a), onde, foi realizado um rasgo em um dos bags (Figura 6b). Após a coleta, o lodo de ETA

retirado dos bags armazenado em galões (Figura 6c) e foi transferido para o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), onde, foram acondicionados em galões de polipropileno de 200L com tampa (Figura 6d).

Figura 5 - Etapas do processo de coleta do lodo de ETA: a) Bags têxteis de armazenamento do lodo de ETA; b) Área onde foi realizado o rasgo para coleta; c) coleta do Lodo de ETA; d) Lodo de ETA já coletado e armazenado no laboratório do IFTO



Fonte: Acervo da Autora.

O material precisa estar em uma granulometria menor de modo que seja viável a incorporação na mistura. Bueno (2008) define a granulometria como a distribuição de partículas de um determinado agregado, segundo as suas dimensões, ela é obtida através de peneiramento, que consiste em separar uma mistura de partículas de vários tamanhos em duas ou mais porções onde, cada uma delas, apresente tamanhos mais uniformes que a mistura original.

Para atingir a granulometria necessária do material, o seu processamento foi iniciado no britador antes de ser encaminhado para produção dos tijolos.

No Britador (Figura 7b) o diâmetro do material foi ainda mais reduzido, viabilizando a sua mistura para a fabricação dos tijolos.

Figura 6 - Representação das etapas de processamento do Lodo da ETA: a) Diâmetro do Lodo de ETA b) Lodo de ETA passando pelo britador no processo de obtenção do material finamente dividido.



Fonte: Acervo da Autora.

Após o processamento para a redução de granulometria e redução do diâmetro do material, ele foi recolhido e acondicionado em um recipiente de 200L de polipropileno com tampa usado de forma exclusiva para essa finalidade. Já acondicionados, foram conduzidos para a fábrica de tijolos ecológicos Eco Modulares, também localizada na cidade de Palmas. Já na fábrica, o lodo de ETA triturado, foi submetido a uma peneira circular de 1,4mm (Figura 8) de modo a gerar um pó finamente reduzido.

Figura 7 - Material processado manualmente na peneira circular



Fonte: Acervo da Autora.

A argila (Figura 8b) e a areia (figura 8a) utilizadas no experimento, foram as mesmas que são usadas pela Eco Modulares para a produção dos seus tijolos comerciais, e ambas são peneiradas na peneira de 1,4mm para uma granulometria ótima. Ambos os materiais ficam armazenados no pátio da empresa e ambos foram adquiridos como forma de doação da empresa para o experimento.

Figura 8 - (a) Fotografia agregado miúdo natural proveniente de rio; (b) Fotografia do saibro empregados na produção do bloco de solo-cimento



Fonte: Acervo da Autora.

4.1.2 Fabricação dos blocos de alvenaria de solo-cimento com resíduos de lodo de ETA

Como já mencionado, os materiais empregados no estudo, foram adquiridos através de doação. A areia e argila empregados no estudo, foram recolhidos no pátio da empresa Eco Modulares, onde foram produzidos os tijolos. O cimento empregado para a realização dos ensaios foi o CPV ARI, em decorrência das suas propriedades de alta resistência inicial.

Os materiais sólidos foram pesados em uma balança do modelo AD5000-R, que pertence à empresa Eco Modulares, conforme os traços que foram escolhidos e que estão apresentados na Tabela 1 abaixo, é importante ainda frisar que o traço 0 de lodo que será utilizado como parâmetro de comparação no presente estudo, representa o traço comercial que é produzido pela Eco Modulares:

Tabela 1 - Traços usados nos ensaios (Valores em kg)

Traço	Variáveis de ensaio		
	Lodo (x1)	Cimento (X2)	Saibro (X3)
1	0,07 (0,84)	0,28 (3,36)	3,15 (37,8)
2	0,28 (3,36)	0,28 (3,36)	2,94 (35,28)
3	0,07 (0,84)	0,53 (6,36)	2,9 (32,28)
4	0,28 (3,36)	0,53 (6,36)	2,69 (32,28)
5	0 (0)	0,41 (4,92)	3,09 (37,08)
6	0,35 (4,2)	0,41 (4,92)	2,74 (32,88)
7	0,18 (2,16)	0,2 (2,4)	3,12 (37,44)
8	0,18 (2,16)	0,61 (7,32)	2,71 (32,52)
9	0,18 (2,16)	0,41 (4,92)	2,91 (34,92)
10	0,18 (2,16)	0,41 (4,92)	2,91 (34,92)
11	0,18 (2,16)	0,41 (4,92)	2,91 (34,92)
	21,45	49,28	352,77

Fonte: Acervo da Autora.

A tabela acima apresenta valores em kg dos materiais necessários para a confecção de uma unidade de tijolo, e os valores entre parênteses a quantidade necessária para a produção de doze tijolos para cada traço.

Os materiais foram pesados e adicionados separadamente, e levados para serem homogeneizados por uma máquina denominada de multiprocessador (Figura 10a), nele a matéria-prima é moída e misturada. Desse modo, os materiais que já haviam sido adicionados separadamente, foram misturados para então serem

encaminhados para a prensa onde atingiriam a forma de tijolos. O material é encaminhado para a prensadora por meio de uma esteira (Figura 10b)

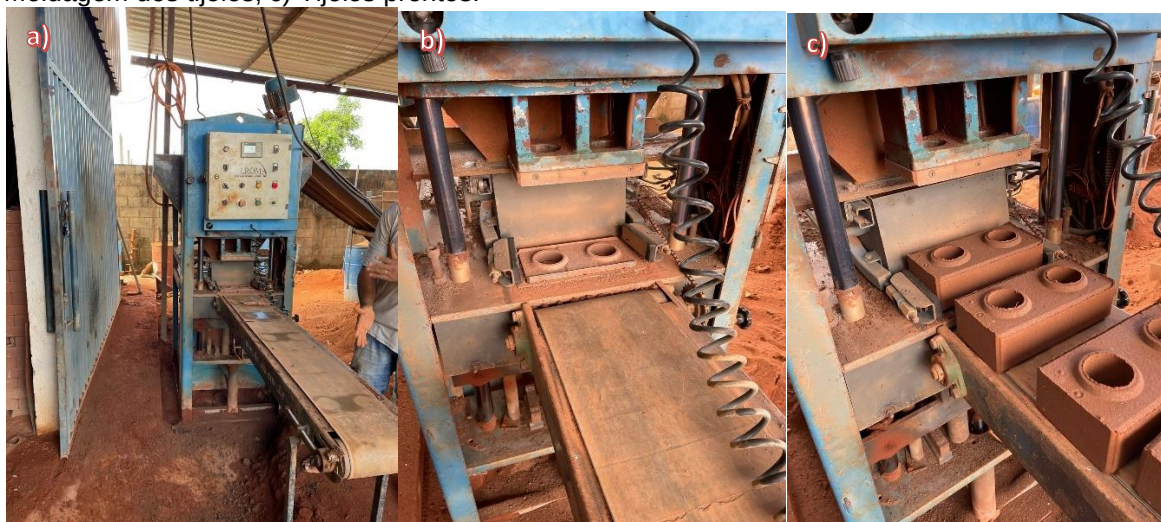
Figura 6 - Processo de mistura e homogeneização dos traços: a) Multiprocessador; b) Esteira que transporta o material até a prensa.



Fonte: Acervo da Autora.

O material misturado, é então encaminhado para a produção dos tijolos, por meio da esteira, para a moldagem na prensa. A prensa usada é da marca Al Roma (Figura 11a e Figura 11b). Ela transforma a mistura em tijolos com dimensões de 25cm x12,5cm x 6,5cm (Figura 11c):

Figura 10 - Processo de fabricação prensagem e fabricação dos tijolos: a) Prensa Al Roma; b) Moldagem dos tijolos; c) Tijolos prontos.



Fonte: Acervo da Autora.

Após a prensagem, os tijolos passam por uma esteira até a área de armazenamento, onde são acondicionados sob paletes (Figura 12).

Figura 11 - Tijolos acondicionados em paletes



Fonte: Acervo da Autora.

Todos os traços, incluindo o traço comercial (traço 0) foram produzidos no mesmo dia, de modo que fosse viabilizada uma comparação real entre eles. Os tijolos foram envolvidos em plástico filme (Figura 13) e ficaram armazenados no galpão da Eco modulares por 28 dias para sua cura.

Figura 12 - Tijolos armazenados para a cura



Fonte: Acervo da Autora.

Ao término dos 28 dias, os tijolos foram transportados para o Laboratório de Máquinas do IFTO (Figura 14).

Figura 13 - Tijolos no IFTO



Fonte: Acervo da Autora.

Os ensaios realizados de resistência a compressão simples foram realizados em todos os tijolos de cada um dos traços feitos com 28 dias de cura conforme descreve a ABNT NBR 8492 (2012). Os resultados da resistência à compressão de cada tijolo devem ser demonstrados individuais e cada deve possuir resistência maior ou igual a 1,7 MPa e a média dos traços não deve ser menor que 2 Mpa.

Foi realizado o teste de determinação da resistência a compressão conforme método NBR 8492 (ABNT, 2012), visando atender os parâmetros estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012). A Norma preconiza em seu item 4.2 que os tijolos ecológicos que precisam passar por testes de resistência devem ser cortados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão exatamente do mesmo tamanho, empilhados e colados com uma argamassa de cimento e areia, uma vez que para que passem pelo ensaio, precisam estar em formato de prisma.

Para o corte dos blocos, foi utilizada a máquina policorte do IFTO (Figura 15a) onde, eles foram cortados ao meio, e retirada uma das rebarbas do tijolo para que eles pudessem ser empilhados um em cima do outro. Após os tijolos passarem pela policorte eles ficam divididos em duas partes iguais cada como mostra a Figura 15b.

Figura 14 - Processo de preparação dos tijolos para o ensaio de resistência a compressão simples: a) Corte dos tijolos; b) Tijolos cortados aguardando a próxima etapa.



Fonte: Acervo da Autora.

Os corpos de prova foram cortados ao meio, superpostos e ligados com argamassa de cimento. Visando a plenitude das faces das peças, procedeu-se o capeamento com argamassa, conforme preconizado pela NBR nº 8492 (ABNT, 2012). A areia usada para a argamassa do capeamento foi a do laboratório de materiais do IFTO, que foi pesada na balança de precisão (AD500-R) do laboratório, o cimento usado no capeamento foi o Cimento Portland CP II F 40 da marca Goiás cimentos, com material carbonático, utilizando no traço 1:3, com 10kg de cimento e 30kg de areia, a água foi adicionada de acordo com a consistência da massa, essas quantidades são suficientes para a mesa de vidro do local (Figura 16):

Figura 15 - Preparo da pasta de cimento em mesa de vidro para o capeamento



Fonte: Acervo da Autora.

O capeamento nada mais é que uma argamassa de areia, cimento e água bem fluida para que se espalhe bem na mesa de vidro, que é onde os blocos são adicionados para serem nivelados com auxílio de nível de bolha, a mesa de capeamento fica no laboratório de máquinas do IFTO e para cada traço foram produzidos 10 blocos, desses 7 blocos de cada traço passaram pelos ensaios de compressão simples e 3 pelos ensaios de absorção de água.

O capeamento deve ocorrer nas duas faces do bloco, devendo ficar no mínimo 24 horas em uma das faces para o seu endurecimento. Após esse tempo a mesa em que ocorre o processo deve ser limpa, e uma nova argamassa fluída deve ser produzida para o capeamento da outra face do bloco.

Após o endurecimento da massa de capeamento das duas faces, os corpos de provas foram imersos em água por um período de 24 horas antes de serem submetidos ao ensaio de compressão simples. A Figura 17, mostra o tanque ainda seco com os blocos em formato de prisma dispostos:

Figura 16 - Corpos de prova no tanque aguardando imersão



Fonte: Acervo da Autora.

Após as 24 horas submersos os prismas foram identificados para serem rompidos no ensaio de resistência a compressão simples. A resistência à compressão simples do corpo de prova foi obtida pela divisão da carga de ruptura pela sua área da seção transversal (Figura 18). A média aritmética dos valores individuais obtidos para cada corpo de prova foi determinada a resistência média de cada composição.

Figura 17 - Máquina universal de ensaios modelo - 10.000



Fonte: Acervo da Autora.

Para os ensaios, foi utilizada uma máquina universal de ensaios modelo, da marca EMIC, para carga máxima de 100 kN.

Como já mencionado, em 3 dos 10 blocos fabricados para cada traço, foi realizado o teste de absorção de água conforme método NBR 8492 (ABNT, 2012), visando atender os parâmetros estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012). O ensaio de absorção de água foi conduzido levando o tijolo a estufa da marca Vulcan (EES-283D) (Figura 19a) com temperatura entre 105 a 110°C durante 24 horas, medindo a massa dos tijolos após esse tempo, e posteriormente levados ao tanque para a imersão (Figura 19b) e após 24 horas foram retirados e novamente medindo suas massas saturados.

Figura 18 - Processo de preparação para o teste de absorção de água: a) Blocos em estufa a 100°C; Bloco imersos em água após a pesagem seca



Fonte: Acervo da Autora.

4.2 ENSAIOS FÍSICOS E QUÍMICOS: DO PROCESSAMENTO A FABRICAÇÃO

Nesta etapa será caracterizado o resíduo de lodo, de acordo com as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Serão realizados os ensaios para determinação da massa específica, massa unitária compactada, massa unitária no estado solto, granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura.

4.2.1 Ensaio de massa específica

Os ensaios de massa específica servirão para quantificar a massa total dos tijolos, incluindo-se os espaços vazios e de água com o volume do material, para isso, serão seguidas as diretrizes das normas ABNT NBR NM 26 - Amostragem de agregados - método de ensaio, ABNT NBR NM 27 - Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório, ABNT NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, ABNT NBR NM 23 – Determinação da massa específica - Determinação de massa específica e massa específica aparente.

De modo a reunir os seguintes dados: massa da amostra, massa do picnômetro mais água, massa do picnômetro mais água com material, massa deslocada e volume do material. Para que assim, seja possível se calcular a massa específica e o peso específico.

4.2.2 Módulo de finura e dimensão máxima

Foi também utilizado o módulo de finura para realizar a separação dos agregados em lotes do mesmo módulo, conforme a norma ABNT NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Com a dimensão máxima se determina o maior diâmetro de agregado na amostra, para isso leva-se em consideração a porcentagem em peso do agregado presente em cada peneira.

4.2.3 Avaliação da resistência mecânica dos blocos de solo-cimento através de ensaios de compressão uniaxial

Após 28 dias do início do processo de cura, foi realizado o ensaio de resistência mecânica dos corpos de prova. Os blocos foram capeados como descrito no item 4.1.2 desse trabalho. Para a realização dos ensaios de resistência mecânica, utilizou-se a máquina universal de ensaios modelo da marca EMIC, para carga máxima de 100 kN,

atendendo a NBR 10834/2013. Os blocos têm as seguintes dimensões 25,0 de comprimento, 12,5 cm de largura e 6,5 cm de altura.

4.2.4 Avaliação da absorção de água nos blocos de alvenaria

Após os 28 dias os tijolos produzidos passaram por análise de absorção de água, para verificar o atendimento à norma ABNT NBR 8492. O ensaio foi realizado levando os tijolos a estufa da marca Vulcan (EES-283D), a 105° durante 24 horas, após o tempo completo, eles foram levados a balança (AD5000-R) e anotado as suas massas, e levados em sequência ao tanque para imersão por 24 horas, retirados e secados para eliminar o excesso de água, e levados novamente a balança (AD5000-R) e anotado suas massas. Os resultados obtidos com o ensaio foram comparados com os blocos sem adição de resíduo.

4.3 PLANEJAMENTO FATORIAL DE DUAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES: A PARTIR DO DELINEAMENTO CENTRAL COMPOSTO ROTACIONADO (DCCR)

Para se obter os traços e as quantidades dos materiais foi utilizado o planejamento fatorial envolvendo duas variáveis independentes em dois níveis codificados distintos, essas variáveis são o Lodo de ETA e o cimento.

A metodologia empregada foi o Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR), essa metodologia emprega níveis codificados para estabelecer uma correlação entre os limites estáticos e a quantidade de produto a ser misturado na formação de um traço. Um traço representa um bloco de alvenaria de solo-cimento com um determinado grau de substituição de solo por resíduos, dessa forma, cada bloco terá uma resistência mecânica e uma absorção de água característica, que são chamados de y resposta (PEREIRA, 2018).

Percebe-se que esse tipo de experimento leva um delineamento experimental conhecido como 2^3 . Porém, em função do estudo da literatura em que foi realizada a metodologia “one-at-a-time”, os esforços foram canalizados para o emprego de uma metodologia mais eficiente e robusta na análise dos dados. Para essa análise foi empregado o delineamento do tipo DCCR.

No delineamento além dos 8 pontos dos vértices do espaço estatístico somam-se mais seis traços axiais e três experimentos no ponto central indicados pela figura 4. Nessa abordagem é possível ter acesso a um modelo parametrizado de interação das variáveis e a sua influência, robustez estatística e superfícies de resposta otimizadas, que serão analisadas e plotadas pelo site “*Protimiza Experimental Design*”.

Figura 19 - Variáveis e respostas do aplicativo

Protimiza Experimental Design

1. Variáveis e Respostas | 2. Metodologia | 3. Experimentos

Nome do Experimento
MESTRADO TRAJANO GÓI

Informações:

- Sugerimos que as unidades sejam definidas de forma a obter valores entre 1 e 1000. Por exemplo, utilize 17km e 3,5mg ao invés de 17000m e 0,0035g.
- Todas as variáveis e respostas serão exibidos com 2 casas decimais.

Variáveis

Número de Variáveis: 2

Nome da Variável	Unidades	-1	0	+1
LODO SECO (X_1)	KG	0,07	0,18	0,28
CIMENTO (X_2)	KG	0,28	0,40	0,53

Respostas

Número de Respostas: 2

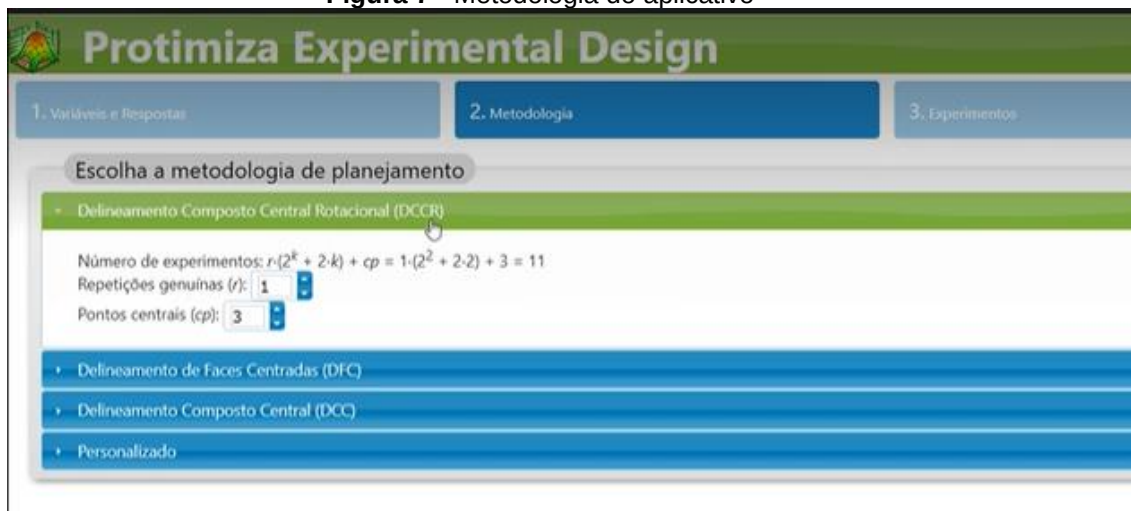
Nome da Resposta	Unidades	Mínimo	Máximo
ABSORÇÃO H ₂ O (Y_1)	%	Automático	Automático
TENSÃO (Y_2)	MPa	Automático	Automático

Fonte: *Protimiza Experimental Design*

A Figura (20) mostra como os dados de entrada do aplicativo foram colocados, do seu limite inferior -1, limite superior +1 e o ponto central 0, obtidos nos resultados da primeira fase do estudo da literatura, os valores apresentam os traços empregados na fabricação dos blocos de alvenaria obtidos a partir da mistura dos materiais. Por final se escolhe quantas variáveis serão analisadas.

A Figura (21) abaixo, parte dois do aplicativo, escolhe-se qual o modelo de cálculo será utilizado, nesse caso o DCCR com uma repetição e três pontos centrais.

Figura 7 - Metodologia do aplicativo



Fonte: *Protimiza Experimental Design*

Escolhido o método de DCCR o aplicativo nos gera o modelo de traços analisados Tabela (1) com suas variações do limite inferior até o limite superior, transformados em quilos, Tabela (2), são os traços utilizados para esse experimento.

Tabela 2 - Níveis codificados para o experimento DCCR

NÍVEIS CODIFICADOS	
Lodo (X1)	Cimento (X2)
-1	-1
1	-1
-1	1
1	1
-1,41	0
1,41	0
0	-1,41
0	1,41
0	0
0	0
0	0

Fonte: Acervo da Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

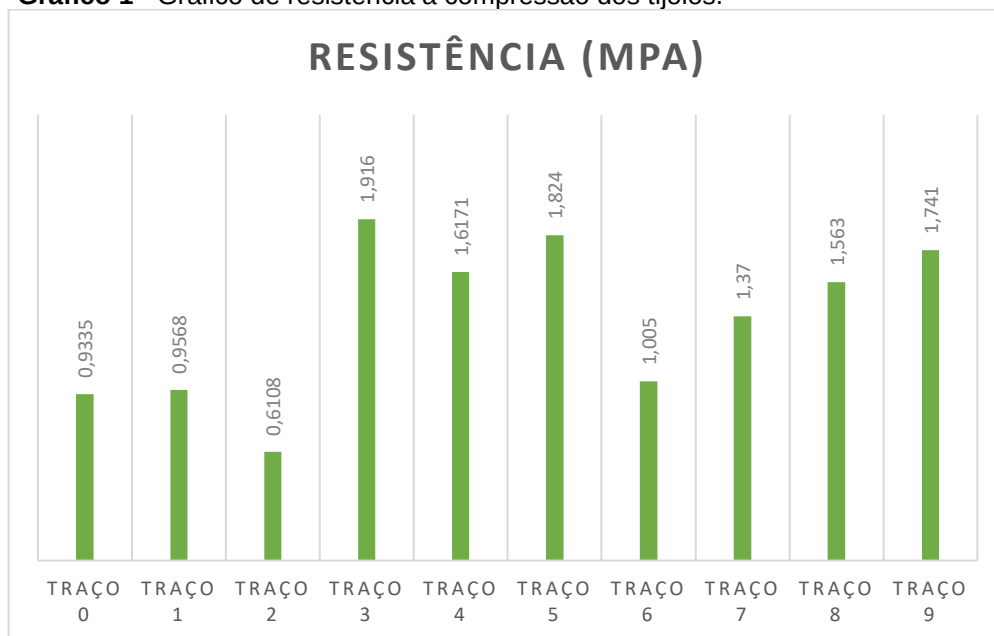
A análise dos resultados levou em consideração as tabelas e gráficos elaborados com base nos resultados obtidos nos ensaios. O objetivo da análise foi determinar quais composições atingiram as exigências ditadas pelas normas, e quais não obtiveram êxito. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização foram analisados para se verificar como cada variável tem influência nas propriedades físico-mecânicas do produto.

5.1 A FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE ALVENARIA DE SOLO-CIMENTO E AS IMPLICAÇÕES DA SUBSTITUIÇÃO DO SOLO POR LODO DE ETA

A fabricação dos blocos ocorreu a partir da incorporação de diferentes traços do resíduo, de modo que o estudo buscou formular um traço de solo, cimento, e Lodo de ETA, por meio de planejamento experimental que utilize menos cimento e mais Lodo que seja capaz de produzir tijolos de vedação com resistência mecânica à compressão de 2,0 MPa. Estes estudos também foram importantes na determinação do planejamento fatorial.

5.1.1 Ensaios de resistência a compressão e absorção dos blocos

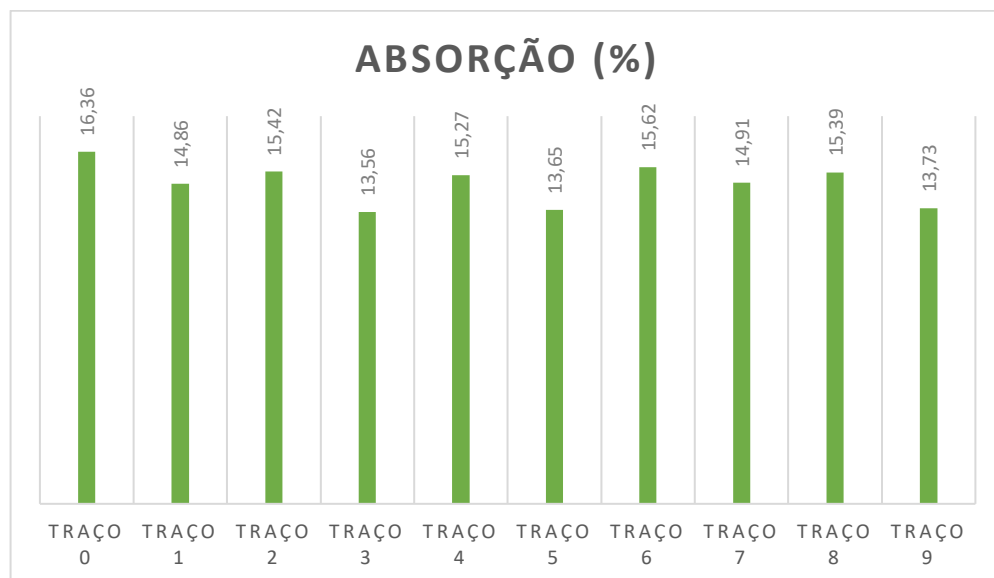
Como mencionado, para cada um dos traços, foram fabricados 10 tijolos, onde desses, 7 passariam pelos ensaios de resistência à compressão e 3 para os ensaios de absorção de água. O gráfico a seguir, mostram os resultados referentes aos ensaios de resistência a compressão simples em cada um dos traços. Todo o ensaio foi realizado de acordo com a NBR 8492 (ABNT,2012).

Gráfico 1 - Gráfico de resistência à compressão dos tijolos.

Fonte: Acervo da autora

O gráfico acima, apresenta os resultados obtidos com diferentes concentrações de lodo de ETA na composição dos corpos de provas, o maior valor de resistência, foi apresentado no traço 3, tendo em vista apenas a análise da média das resistências em Mpa, os traços variaram sua resistência de acordo com o acréscimo de cimento em sua composição. Levando em consideração a NBR 8491/12 que preconiza que nenhum corpo de prova do traço deve possuir menos de 1,7Mpa de resistência mecânica, os traços realizados não atenderam ao requisito.

Os valores resultantes dos ensaios de absorção de água são apresentados na Tabela 13 a seguir e foram obtidos de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012).

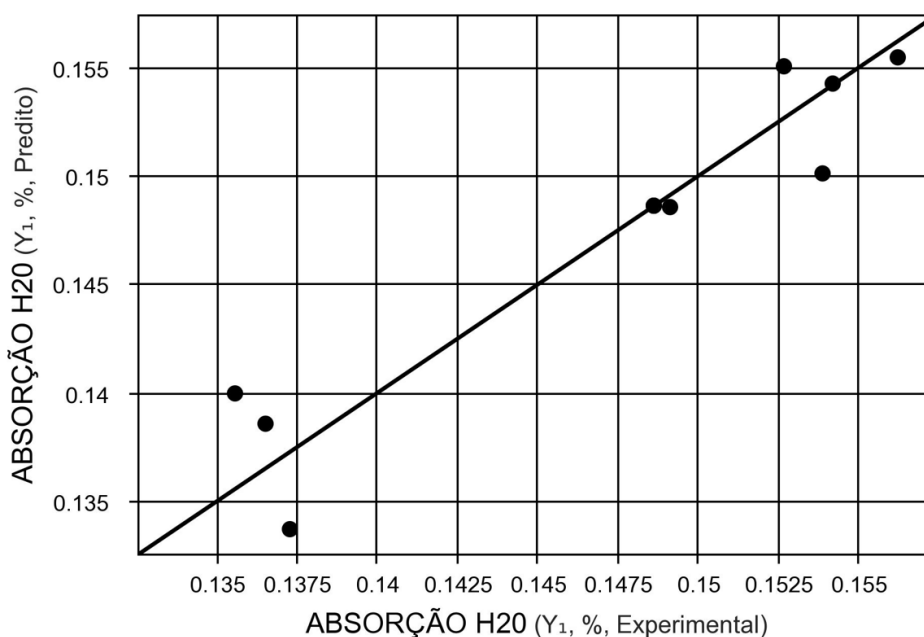
Gráfico 2 - Gráfico de valores de absorção dos tijolos.

Fonte: Acervo da autora

Diante dos dados encontrados no gráfico de absorção, pode-se verificar que a média do teor de absorção do bloco comercial é de 16,36%, com relação aos blocos que introduziram determinadas porcentagens de lodo, a menor taxa de absorção foi do bloco do traço 3, com média de 13,56% e a maior taxa de absorção foi a do traço 6 com 15,62%. Todos os traços ficaram dentro do requisito da norma NBR 8491 (ABNT,2012) que estabelece que a média dos valores da absorção não deve ser superior a 20%.

O Gráfico 3 abaixo mostra a relação de absorção dos blocos:

Gráfico 3 - Gráfico de dispersão apresentando os valores preditos e experimentais de absorção de água dos blocos



Fonte: Acervo da autora

O Gráfico acima nos mostra que os valores de absorção dos traços ficaram próximos da linha, nos mostrando um processo de produção satisfatório realizado.

5.1.2 Fabricação de blocos de alvenaria através da substituição de solo por lodo de ETA: Planejamento Fatorial

Foram empregados diferentes traços com adição de lodo de ETA em um planejamento fatorial completo, a Tabela 3, mostra os traços usados para a análise DCCR, onde foi preciso uma amostra com 5 níveis em que foram medidos a sua

resistência e absorção de água como respostas aos traços formulados para os experimentos. Na tabela 3 podem ser visualizados os valores percentuais praticados, que estão associados com a tabela de valores codificados empregados no modelo estatístico escolhido.

Tabela 3 - Análise delineamento fatorial - DCCR

Níveis	Lodo (X1)	Cimento (X2)	% (x1)	% (x2)
-1	0,07 Kg	0,28 Kg	2,00%	8,00%
1	0,28 Kg	0,53 Kg	8,00%	15,14%
-1,41	0 Kg	0,2 Kg	0,00%	5,71%
1,41	0,35 Kg	0,61 Kg	10,00%	17,43%
0	0,18 Kg	0,41 Kg	5,14%	11,71%

Fonte: Acervo da autora

A análise de variância, permite a comparação de vários grupos ao mesmo tempo usando as variáveis contínuas, o método para essa análise é iniciado após as amostras possuírem médias iguais, posteriormente, as hipóteses são testadas por meio de estatística F de Snedecor e. Após esse processo deve-se ocorrer uma análise da hipótese de que as médias iguais pode ser ou não aceita. A rejeição ocorre caso o F calculado seja maior que o F tabelado, conforme pode-se verificar na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Análise de variância dos resultados experimentais obtidos.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	0	5	0	8,9	0,01593
Resíduos	0	5	0		
Falta de Ajuste	0	3	0	Infinity	NaN
Erro Puro	0	2	0		
Total	0	10			

Fonte: Acervo da autora

Verificou-se que, $F_{calc} > F_{tab}$, e com isso, tem-se que a hipótese é rejeitada, de forma que é possível concluir que existe pelo menos uma média que difere significativamente da outra. Ademais, pode-se confirmar tal rejeição a partir do p-valor, também apresentado na Tabela 16. Se o p-valor for maior que o nível de significância (α), a hipótese de igualdade será rejeitada. No estudo α é 5%, tem-se p-valor menor que α , confirmando a análise anterior. O valor de R^2 foi de 89,85%, esse valor

considerando-se a utilização de resíduo para a formulação dos blocos apresenta-se coerente.

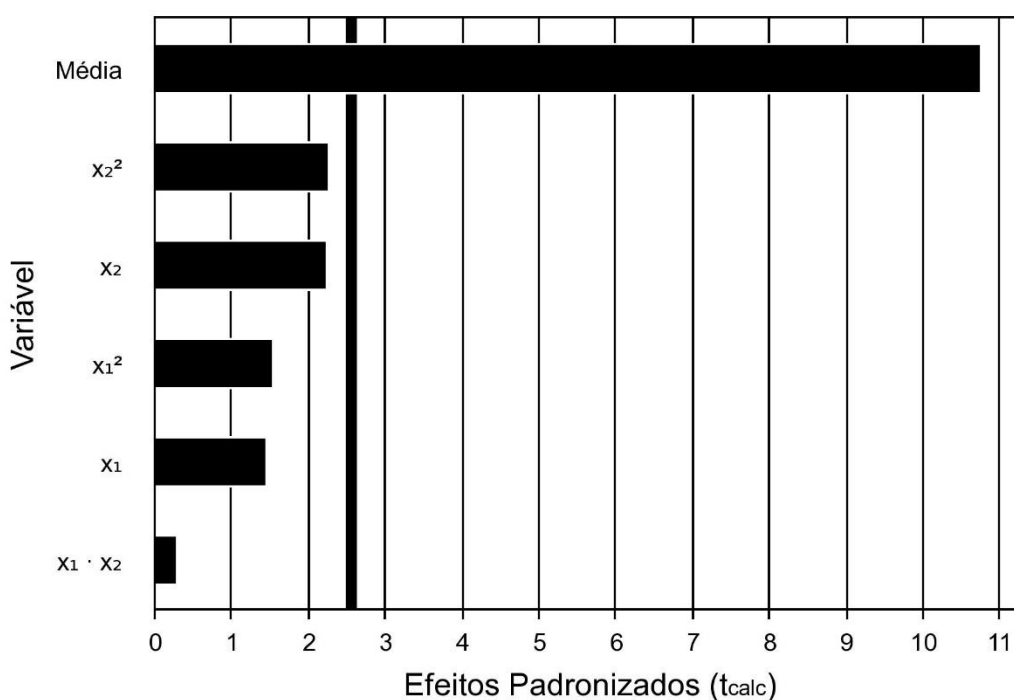
Tabela 3 - Análise da regressão dos resultados experimentais obtidos.

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	0,15	0	76,25	0
X_1	0,01	0	4,88	0,0045
X_1^2	0	0	-0,64	0,5516
X_2	0,01	0	4,23	0,0082
X_2^2	0	0	-0,53	0,6173
$X_1 \cdot X_2$	0	0	-1,41	0,2184

Fonte: acervo da autora

Com essa análise, foi possível obter um $R^2 = 0,8985$. Para uma estatística descritiva é necessário ter cuidado ao interpretar R^2 . Enfatizando a verificação de discrepâncias entre os valores preditos e observados. Com isso, pode ser avaliada a importância da variância residual, que ao ser pequena, permite realizar a análise de resíduos, que dentre outras técnicas de diagnósticos possibilita a escolha o melhor modelo a ser empregado (REGAZZI, 2015). Em relação a isso, é possível observar a o Gráfico 4 de Pareto abaixo:

Gráfico 4 - Gráfico de Pareto para a análise a 95% de confiança das variáveis e suas interações.

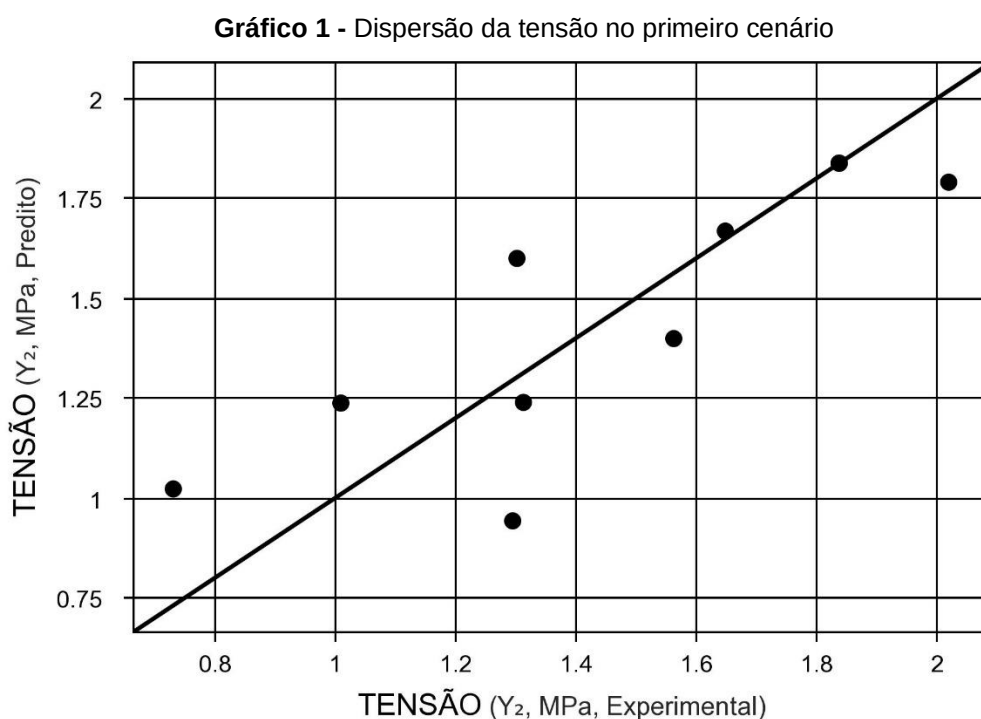


Fonte: Acervo da autora

A partir disso, observa-se que a força das interações produzidas pela presença do lodo de ETA (x_1) e do cimento (x_2) estão abaixo do nível de significância de 95%

confiança. Da mesma forma com as interações do lodo (x1) com o lodo(x1), do cimento(x2) com o cimento(x2), podem ser descartadas para a reformulação do modelo paramétrico, permitido pelo uso do modelo.

A partir do Gráfico 5 de dispersão apresentado abaixo, observa-se que os traços apresentados mostraram pouca dispersão e estão dentro da faixa de tensão esperada pelo estudo da literatura realizado anteriormente.



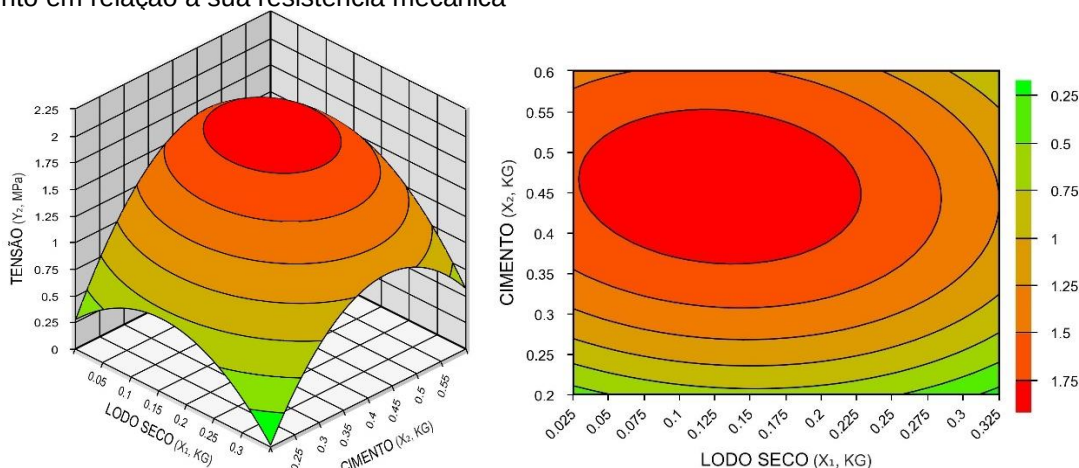
Fonte: Acervo da autora

De acordo com os resultados obtidos, com o modelo estatístico, é possível gerar as superfícies de resposta dos efeitos com relação a variação dos teores de Lodo de ETA utilizado na substituição do solo dos blocos para com sua resistência mecânica. A análise é possível por uma variação controlada, de acordo com o Modelo 01 gerado pelo aplicativo da *Protimiza Experimental Designed*.

MODELO 01: $Y_1 = 0,15 + 0,01 x_1 + 0 x_1^2 + 0,01 x_2 + 0 x_2^2 + 0 x_1 x_2$

Ao utilizar o Modelo 01, fórmula para obter as relações das variáveis, é produzida uma superfície de resposta, Gráfico 6, para a relação de efeitos produzidos nas propriedades mecânicas dos blocos.

Gráfico 2 - Superfície de resposta obtidas a partir da análise da resposta das composições Lodo e cimento em relação a sua resistência mecânica

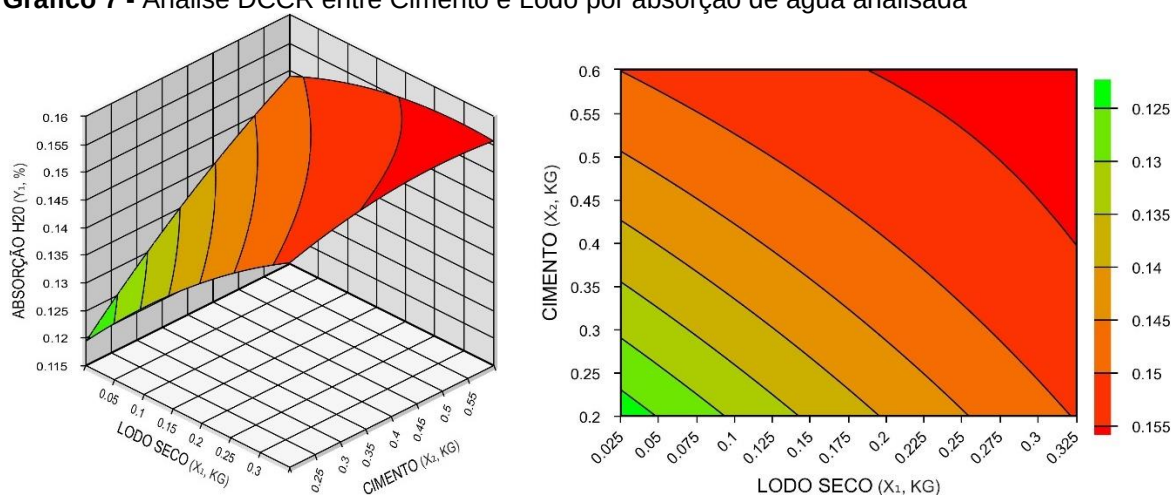


Fonte: Acervo da autora

A mesma análise, é feita para absorção de água, o Modelo 02, é utilizado para obter uma superfície de resposta para observar a correlação das variáveis para sua absorção, Gráfico 7. Nota-se que a absorção de água aumenta de acordo com acréscimo do teor de cimento. Sendo o ideal para a absorção de um valor menor que 20%. A coloração do gráfico do verde mais claro ao vermelho mais escuro significa o aumento da tensão em Mpa.

MODELO 02: $Y_2 = 1,84 - 0,15 x_1 - 0,19 x_1^2 + 0,23 x_2 - 0,28 x_2^2 - 0,04 x_1 x_2$

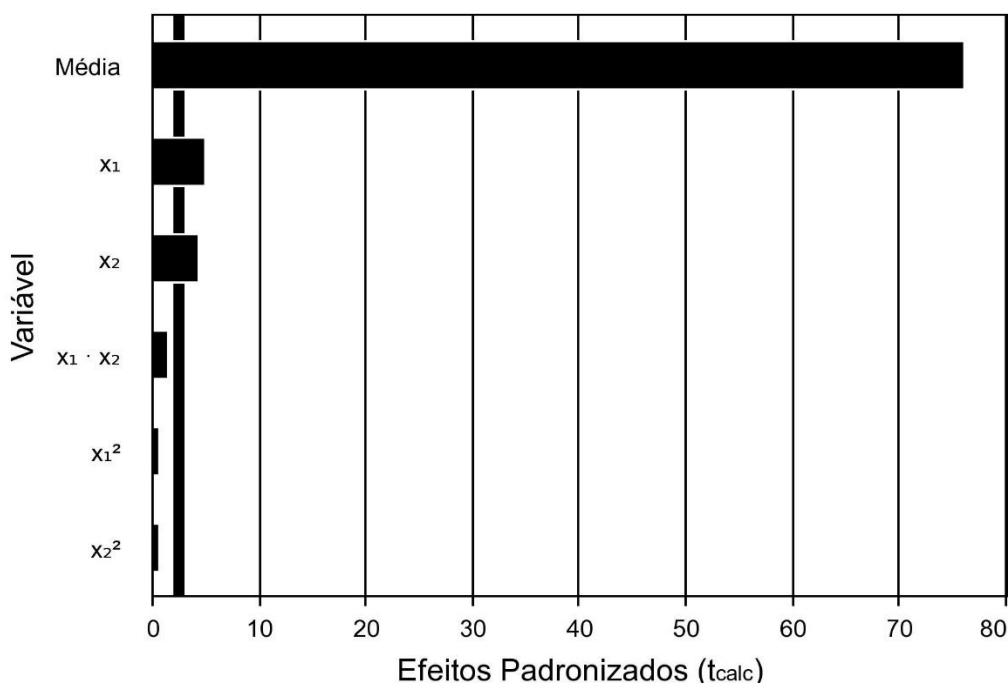
Gráfico 7 - Análise DCCR entre Cimento e Lodo por absorção de água analisada



Fonte: Acervo da autora

Observando os efeitos das relações das variáveis para absorção de água, Gráfico 7, obtêm que a principal variável que influencia para o aumento da absorção é o cimento. A coloração do gráfico do verde mais claro ao vermelho mais escuro significa o acréscimo de absorção em porcentagem.

Gráfico 8 – Gráfico de Pareto para a análise a 95% de confiança das variáveis e suas interações a partir do modelo estatístico empregado para a análise da absorção de água nos blocos de alvenaria produzidos.



Fonte: Acervo da autora

A partir do gráfico de Pareto, observa-se que a força das interações produzidas pela presença do lodo de ETA (x_1) está abaixo do nível de significância a 95% de confiança. O mesmo ocorre com as interações do lodo (x_1) com o lodo (x_1), do cimento (x_2) com cimento (x_2).

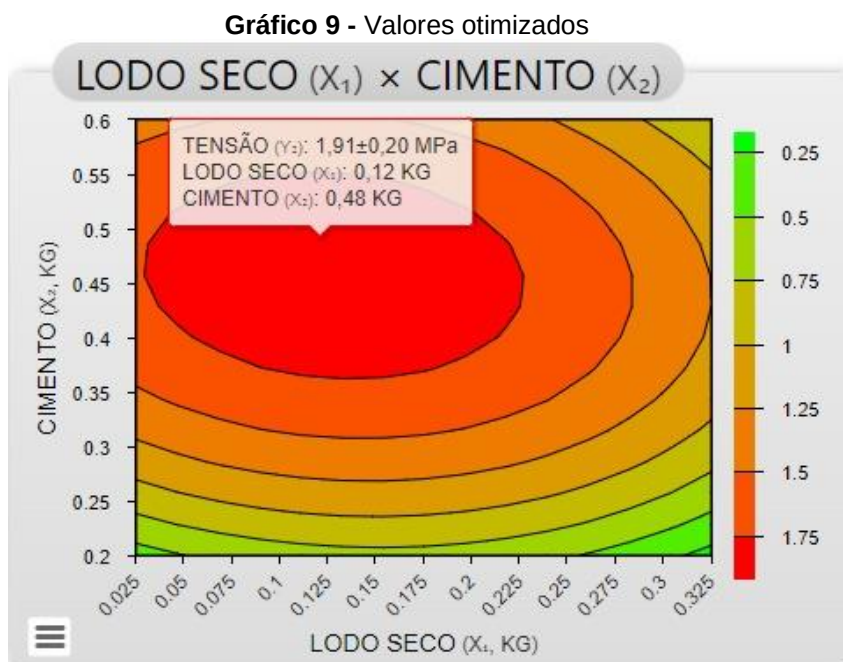
5.1.3 Traços possíveis para os tijolos e a destinação dos mesmos

Com o DCCR, foi possível observar as interações do lodo de ETA com a resistência mecânica, com objetivo obter um tijolo de solo-cimento com o resíduo em sua composição e que conseguisse atingir a resistência de 2,0 MPa.

Ao analisar os gráficos 13 e 14, nota-se a influência das variáveis (x_1) e (x_2) na evolução da resistência mecânica e absorção de água. Sendo assim é possível

estabelecer alguns valores onde os teores de cimento e lodo sejam compatíveis com o necessário para a resistência e o com os objetivos desse trabalho

O gráfico 17 abaixo obtido no programa “*Protimiza Experimental Design*”, mostra os valores de lodo e cimento que seriam necessários para atingir a resistência necessária.



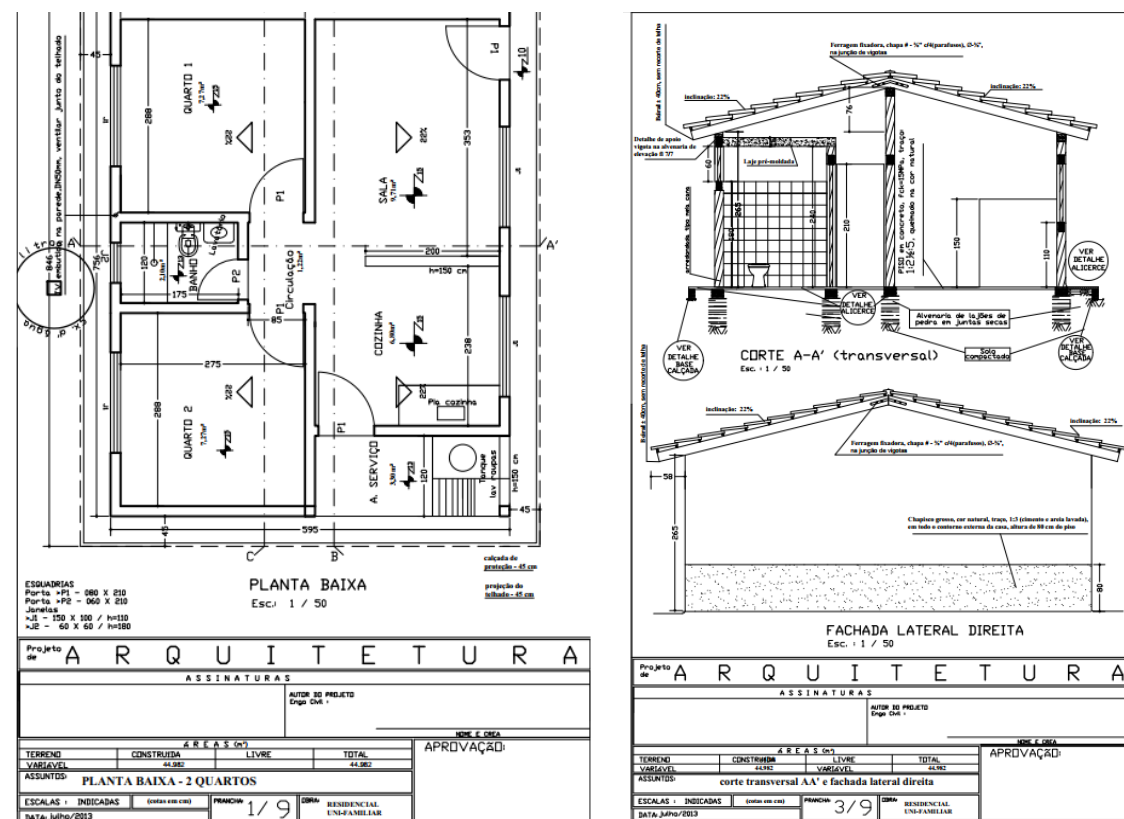
Fonte: Acervo da autora

Pelos valores encontrados no gráfico 9, os valores otimizados de cimento e lodo se assemelham ao traço 3 produzido, o traço ideal possui 0,12 Kg de lodo (X_1) e 0,48 Kg de cimento (x_2), correspondendo as porcentagens de: 82,85% de saibro, 13,72% de cimento e 3,43% de lodo.

Esse bloco pode ser uma alternativa viável para a construção civil tendo características sustentáveis, e dando uma possível destinação para a grande quantidade de Lodo de ETA produzido.

Fazendo uma análise mais a fundo no cenário da construção civil, podemos utilizar a pesquisa para uma situação real, utilizando tijolos ecológicos em uma casa padrão de 44,98m² de dois quartos da Caixa Econômica Federal, conforme Figura 21 abaixo:

Figura 21 - Projeto de Habitação para substituição de tijolos convencionais por tijolo com lodo de ETA



Fonte: Acervo da Autora

Para as dimensões do projeto de habitação básico demonstrado nas imagens, seriam necessárias 7700 unidades de tijolos ecológicos com lodo de ETA com o traço ideal, para a vedação completa da residência, sendo esse um destino eficiente e sustentável para o resíduo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo, se mostrou de grande relevância para a viabilização do uso de lodo de ETA na construção civil por meio da fabricação de tijolos ecológicos. De modo que tecnicamente, a substituição do solo por lodo de ETA pode revelar vantagens tanto econômicas quanto ambientais, pois, a adição desse resíduo para o reaproveitamento sustentável pode ser benéfica para reduzir diversos impactos ambientais.

O presente trabalho concluiu o seu objetivo de confeccionar um tijolo ecológico com resistência mecânica e absorção de água que estivessem de acordo com a NBR 10836/94, NBR 8492/12 e NBR 8491/12, para blocos de vedação. Foram realizados estudos nos diferentes traços produzidos que possibilitaram a criação de um traço de um bloco com características sustentáveis.

O estudo contemplou a criação de diferentes combinações de quantidades dos materiais lodo e cimento para a produção dos tijolos, mas como apresentado essas características se modificam com a influência dos materiais, podendo causar uma diminuição da resistência mecânica dos blocos, não sendo possível empregar os mesmos para a função de blocos de vedação em alguns dos traços estudados.

Então de acordo com a pesquisa, e com auxílio da estatística, a unidade de tijolo ecológico que possui um traço satisfatório para as prescrições da norma possui 3,5 Kg de massa total, 82,85% de saibro, 3,43% de Lodo de ETA, e 13,72% de cimento, sendo entre os traços produzidos o traço 3 mais próximo dos valores otimizados. Representando 7700 unidades de tijolos numa casa de dois quartos nos padrões da Caixa Econômica Federal, que significa uma introdução de aproximadamente 920 quilos de Lodo de ETA por casa construída, sendo necessário para 100 casas 92 toneladas do resíduo.

Portanto o estudo esclarece que o tijolo se produzido com o traço otimizado, é adequado pela norma, apresenta características sustentáveis, já que possibilita uma destinação do Lodo de ETA, para que eles não sejam descartados de forma inadequada ou em aterros sanitários. Além disso o tijolo ecológico possui vantagens para a construção civil pois de acordo com o SEBRAE, o tijolo ecológico usual sem o uso de resíduo pode gerar uma economia de até 40% em uma obra.

Mas, considerando que a incorporação do lodo de ETA para a fabricação dos tijolos ecológicos ainda pode ser considerada como uma inovação, é imprescindível

que, pesquisadores busquem uma avaliação mais efetiva de modo a realizar comparações com os resultados apresentados neste estudo.

Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se que sejam empregados diferentes tipos de solos e composições da mistura, com a finalidade de alcançar uma mistura ideal para que os tijolos sejam capazes de atender demandas mais abrangentes de uso dos tijolos ecológicos com lodo de ETA, além de realizar um novo estudo acrescentando a variável água.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 10004/1994 - Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 10833/2012 – Fabricação de Tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica- Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 10834/2013 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural. Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 10836/1994 - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 7211/2005 – Agregados para concreto – Especificação - Módulos de Finura**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 8492/2012 - Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinando da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 15270-2/2005 – Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 248/2001 – Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 26/2009 – Amostragem de agregados**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 27/2001 – Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 45/2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 46/2001 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75um por lavagem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 52/2002 – Aparente Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM 6457 – Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro: 1986.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. **NBR NM-ISSO 3310- 1/1997 – Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1 - Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 10004: Resíduos sólido**. Classificação. Rio de Janeiro 2004.

AHMAD, Tarique; AHMAD, Kafeel; ALAM, Mehtab. Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1-13, 2016.

BONGIOVANI, Milene Carvalho et al. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 2, p. 167-170, 2010.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da União. Brasília, 02 de agosto de 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Brasília: Diário Oficial da União, 2010

CARNEIRO, Charles; ANDREOLI, Cleverson V. Lodo de estações de tratamento de água: Gestão e perspectivas tecnológicas. **Curitiba: SANEPAR, Thinks Creative**, 2013.

CASTRO, Adriana Petito de Almeida Silva; SILVA, Fernando Souza da. Incentivo ao uso de produtos de baixo impacto ambiental através da disciplina de materiais de construção civil. **Revista Complexus**, Salto, v. 3, n. 2, p.50-57, maio 2011.

CONAMA. **Resolução nº 430/2011**. Que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso: 22 set. 2020.

COSTA, Edmilton Rodrigues Moraes. OLIVEIRA, Ginarajadaça Ferreira dos Santos. Caracterização e destinação ambiental do lodo gerado pelas Estações de Tratamento de Água – ETAS. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 10, Vol. 24, pp. 25-38. Outubro de 2020.

CUNHA, Thatiana Emanuelle; MIRANDA, Daniel Augusto. Estudo de alternativas para abastecimento de água para consumo humano no município de Belo Horizonte (MG). **Revista Petra**, v. 1, n. 2, 2015.

DA CUNHA, Geremias Dourado et al. Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. **Nature and Conservation**, v. 12, n. 2, p. 19-30, 2019.

DE SOUZA, Thiago Magalhães Moraes; ALMEIDA FILHO, Aldecy. Caracterização Físico-Química do Resíduo (Lodo) de ETA, no período de seca, em Várzea Grande-MT. **E&S Engineering and Science**, v. 6, n. 1, p. 74-85, 2017.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Ldibe, 540 p. 2012.

DI BERNARDO, Luiz; BOTARI, Alexandre; SABOGAL-PAZ, Lyda Patricia. Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 82-90, 2005.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S.. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v.31, n.3, p.531-541, 2001.

FERNANDES, Lisiane Heinem; MAINIER, Fernando Benedicto. Os riscos da exposição ocupacional ao cádmio. **Sistemas & Gestão**, v. 9, n. 2, p. 194-199, 2014.

FIAIS, Bruna Barbosa; DE SOUZA, Daniel Sarto. Construção sustentável com tijolo ecológico. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 2, n. 1, 2017.

FONOLLOSA, E. et al. Presence of radionuclides in sludge from conventional drinking water treatment plants. **Journal of Environmental Radioactivity**, Oxford, v. 141, p. 24-31, Mar. 2015.

FREITAS, Daniela de Bacco. **Estudo de melhorias dos sistemas de cloração da água de abastecimento na CORSAN pela instalação de evaporadores de cloro e lavadores de gases**. 2011.

GONTIJO NETO, Trajano Machado. **Alvenaria Eco Eficiente**: Estudo da resistência mecânica de blocos de alvenaria com resíduos inorgânicos em sua constituição. 2018. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2018.

GONÇALVES, Caroline de Paiva; CARDOSO, Adriana de Freitas. **A utilização da cerâmica nas técnicas construtivas em busca da inovação e sustentabilidade**. In: 201 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 60. 2016. Águas de Lindóia, São Paulo, 2016. p. 577 - 587.

JANUÁRIO, Gladys Fernandes; FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, p. 117-126, 2007.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas. SP: Editora Átomo, 2010.

MENDES, Alesi Teixeira. Caracterização do ano hidrológico de Palmas-To. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTECC**. Palmas/TO 17 a 19 de setembro de 2019.

MENDES, M. F.; COELHO, N.M.M. Estudo do uso da Moringa oleifera para remoção de prata e manganês em águas. *Horizonte Científico*, Uberlândia, v.1, n.1, p.1-18, 2007.

MOTTA, Jessica Campos Soares Silva et al. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **E-xacta**, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p. 14, set. /mai. 2014.

NUNES, José Alves. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6 ed. Editora J. Andrade, 2004.

PÁDUA, Elisabete Matallo Marchesini de. **Metodologia da pesquisa: abordagem teórico-prática**. Campinas: Papirus Editora, 2019.

PAIXÃO, L. C. et al. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Revista Cerâmica**, Vol. 54, 63-76, 2008.

PORRAS, Álvaro Chávez; ISAAC, Rucardo de Lima; MORITA, Dione. Use of dry sludge from a treatment water plan station and aggregated recycled from civil construction in the manufacture of cement soil bricks. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, Bogotá, v. 18, n. 2, p.5-28, dez. 2008.

POZZOBON, J. C. et al. Aplicação de lodo de estação de tratamento de água para a produção de cerâmica artística. **54º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**. Foz do Iguaçu. 2010.

REGAZZI, Adair José; SILVA, Carlos Henrique Osório. **Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear em dados de experimento com delineamento em blocos casualizados**. *Ceres*, v. 57, n. 3, 2015.

REYMÃO, Ana Elizabeth; SABER, Bruno Abe. Acesso à água tratada e insuficiência de renda. Duas dimensões do problema da pobreza no Nordeste brasileiro sob a óptica dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. **Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica**, v. 12, p. 1-15, 2009.

RIBEIRO, Lincoln Ronyere Cavalcante. **Processo de produção e viabilidade do tijolo modular de solo-cimento na construção civil no estado do rn**. 2013. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Mossoró, 2013.

RICHTER, Carlos A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

RODRIGUES, Lara Pessin. **Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2012.

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antônio Francisco. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos – Uma estratégia sequencial de planejamentos**. Campinas: Editora Casa do Pão, 2006

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Tratamento de água**. 2021. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/default.aspx>. Acesso em: 10 out. 2021.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Ideias de Negócios: fabrica de tijolos ecológicos**. SEBRAE. 01-06p. Disponível em: <www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ideias/como-montar-uma-fabrica-de-tijolos-ecologicos,ce387a51b9105410VgnVCM1000003b74010aRCRD>. Acesso em: 12 de abril de 2022.

SILVA, M. R. **Incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em tijolo de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais**. 2009. 84f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental) - Faculdade de Aracruz, Aracruz, 2009.

SILVA, Mauro Valério da. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo proveniente de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado) - IPEN – Autarquia Associada a Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.132p.

SOUZA, Juliana Rosa de et al. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. Rede - **Revista Eletrônica do Prodepa, Fortaleza**, v. 8, n. 1, p.26-45, 6 jan. 2014.

TAKAOKA, Marcelo Vespoli et al. Diretrizes de ação: revisão 1. **Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS)**, 2013.

VITORINO, J. P.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. **Revista Cerâmica**, Vol. 55, 385-392, 2009.