



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TRAJANO MACHADO GONTIJO NETO

**FABRICAÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE LODO
DE ETA**

Palmas, TO
2022

Trajano Machado Gontijo Neto

Fabricação de tijolo solo-cimento com incorporação de lodo de ETA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre (a) em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva
Coorientador: Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho

**Palmas, TO
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M149f Machado Gontijo Neto, Trajano.
Fabricação de tijolo solo-cimento com incorporação de lodo de ETA. /
Trajano Machado Gontijo Neto. – Palmas, TO, 2023.
78 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2023.
Orientador: Giulliano Guimarães Silva
Coorientador: Adriano dos Guimarães de Carvalho

1. bloco de solo-cimento. 2. resíduos inorgânicos. 3. resistência mecânica.
4. planejamento fatorial. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

TRAJANO MACHADO GONTIJO NETO

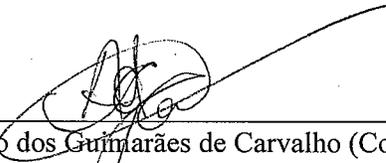
FABRICAÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

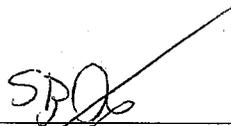
BANCA EXAMINADORA



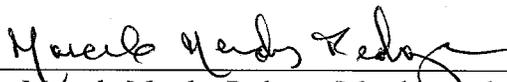
Dr. Giuliano Guimarães Silva (Presidente)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Dr. Sérgio Carlos Bernardo Queiroz (Membro Titular Interno)
Universidade Federal do Tocantins



Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Membro titular interno)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Dr. Moacyr Salles Neto (Membro titular externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Dedico essa dissertação aos meus orientadores, que me instigou a ser a melhor versão de mim do início ao fim desse processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva e Coorientador Prof. Dr. Adriano dos Guimaraes de Carvalho, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Agradeço ao Martinelli, proprietário Ideal Construtora, por toda parceria e disponibilidade para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço aos bolsistas, agora, colegas de profissão Clara Soares e Arthur Araújo por toda disponibilidade e ajuda durante todo esse processo.

Todos os Mestres e Doutores que me proporcionaram conhecimento.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“A base de toda a sustentabilidade é o desenvolvimento humano que deve contemplar um melhor relacionamento do homem com os semelhantes e a Natureza”.

Nagib Anderáos Neto

RESUMO

O presente estudo contempla o processo de análise e desenvolvimento de um bloco de alvenaria de solo cimento com a incorporação de resíduos inorgânicos na sua composição. Esse estudo foi realizado a partir da substituição de parte do solo por uma combinação de resíduos inorgânicos. Foram realizados dois ensaios distintos, comparativos, utilizando-se de proporções de lodo em dois períodos: chuvoso e de estiagem. Os resíduos inorgânicos empregados são componentes do lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA) do município de Palmas/TO e que, atualmente, não possuem um despejo próprio, sendo armazenados em grandes *bags* dentro dos pátios das próprias concessionárias. A partir de uma metodologia focada em um planejamento fatorial completo em dois níveis distintos com duas variáveis independentes: proporção de lodo de ETA (%) e proporção de cimento (%), avaliou-se a resistência mecânica e a absorção de água dos blocos de solo-cimento através das superfícies de respostas otimizadas, onde podem ser visualizados: o comportamento mecânico e a absorção de água em função dessas variáveis. Com os resultados alcançados foi possível estabelecer uma combinação de lodo de ETA que permitiu uma substituição de 3% em massa de solo por resíduos no bloco de alvenaria de solo cimento. Neste grau de substituição de resíduos foram empregados apenas 16% de cimento, com uma resistência mecânica de 2,10 ($\pm 0,26$) Mpa e uma absorção de água de 15%. Com esta formulação foi possível produzir um bloco, que atende as especificações técnicas estabelecidas pela NBR 10836/94 e 8492/12, utilizando a maior quantidade de resíduos e a menor quantidade de cimento possível por bloco. Assim, o produto desenvolvido apresenta-se com um material inovador e sustentável, podendo ser utilizado como material de alvenaria de vedação na construção civil.

Palavras-chave: bloco de solo-cimento. resíduos inorgânicos. resistência mecânica. absorção de água. planejamento fatorial.

ABSTRACT

The present study contemplates the process of analysis and development of a masonry block of soil cement with the incorporation of inorganic residues in its composition. This study was carried out by replacing part of the soil with a mass of inorganic residues. Two different, comparative tests were carried out, using sludge proportions in two periods: rainy and estimation. The inorganic components are from the sludge from the Water Treatment Stations (ETA) in the municipality of Palmas/TO and which currently do not have their own dump, being stored in large bags inside the concessionaires' own yards. From a methodology focused on a complete factorial at two different levels with two independent variables: proportion of water sludge planning (%) and proportion of cement (%), the mechanical strength and absorption of blocks were evaluated. of soil-cement through the surfaces of optimized responses, where the mechanical behavior and water absorption in different functions can be visualized. With the results of blocks of 3, it was possible to establish a ETA of % by mass that suffered a replacement of 3 soil by masonry residues. In this degree of waste replacement, only 16% of cement was used, with a mechanical strength of 2.10 (\pm 0.26) Mpa and a water absorption of 15%. 10 that meet as possible to produce, 9484 cells possible to produce a block/9484, using the largest amount of waste and the least amount of blocks. Thus, the product presented was developed with an innovative and sustainable material, and can be used as a sealing material in civil construction.

Keywords: block of soil-cement. inorganic residues. mechanical resistance. water absorption. factorial design.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1- DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS LODOS E SAIBRO.....	53
GRÁFICO 2 - (A) LODO DESIDRATADO EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS NORMAIS; (B) LODO DE ETA CALCINADO A 300 °C; (C) LODO DE ETA CALCINADO A 600 °C; (D) LODO DE ETA CALCINADO A 900 °C.....	54
GRÁFICO 3 - GRÁFICO DE PARETO – LODO ESTIAGEM	60
GRÁFICO 4 - GRÁFICO DE PARETO – LODO CHUVOSO	60
GRÁFICO 5 – DISPERSÃO DA TENSÃO DO LODO ESTIAGEM.....	61
GRÁFICO 6 – DISPERSÃO DA TENSÃO DO LODO CHUVOSO.....	62
GRÁFICO 7 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA OBTIDAS PARA LODO DE ESTIAGEM.....	63
GRÁFICO 8 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA OBTIDAS PARA LODO CHUVOSO.....	63
GRÁFICO 9 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA O LODO DE ESTIAGEM	64
GRÁFICO 10 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA O LODO CHUVOSO.....	65
GRÁFICO 11 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA COM O PONTO MÁXIMO DE ACORDO COM A MODELAM.	66
GRÁFICO 12 – GRÁFICO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA ENTRE OS TRAÇOS IDEAIS DE ACORDO COM A MODELAGEM.....	68
GRÁFICO 13 – GRÁFICO COMPARATIVO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA OS TRAÇOS IDEAIS DE ACORDO COM A MODELAGEM.....	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	35
TABELA 2 – COMPARATIVO DOS NÍVEIS CODIFICADOS E COM AS VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	42
TABELA 3 – METODOLOGIA APLICADA.....	42
TABELA 4 - NÍVEIS CODIFICADOS PARA O EXPERIMENTO DCCR, EMPREGANDO 2 VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	43
TABELA 5 - TRAÇO E PORCENTAGEM DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE ALVENARIA DE SOLO-CIMENTO COM A INTRODUÇÃO DE RESÍDUOS INORGÂNICOS.....	44
TABELA 6 - ABNT NBR 7211 – MÓDULOS DE FINURA.....	51
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO GRANULOMETRIA DOS LODOS DE ETA DE CADA PERÍODO DA COLETA – NBR NM-ISSO 3310-1.....	51
TABELA 8 – DIFERENÇA EM PERCENTUAL DE MATERIAL PASSANTE ENTRE LODO DO PERÍODO CHUVOSO E LODO DO PERÍODO DE ESTIAGEM.....	52
TABELA 9 – RESULTADO LAUDO ANALÍTICO LABORATÓRIO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	53
TABELA 10 - ANÁLISE DELINEAMENTO FATORIAL - DCCR.....	57
TABELA 11 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA COM LODO COLETADO NO PERÍODO DE ESTIAGEM.....	58
TABELA 12 - 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.....	59
TABELA 13 - SELEÇÃO DE TRAÇO ADEQUADOS A FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO COM A SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR RESÍDUOS INORGÂNICOS.....	67
TABELA 14 - SELEÇÃO DE TRAÇO ADEQUADOS A FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO COM A SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR RESÍDUOS INORGÂNICOS.....	67

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - (1) FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUA E RETENÇÃO DO LODO DE ETA NO <i>BAG</i> . AO FUNDO UM <i>BAG</i> SEMIPREENCHIDO DE LODO; (2) ARMAZENAGEM DO LODO DE ETA CONTIDO EM UMA PILHA PARA TRANSPORTE; (3) FOTOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DO LODO DE ETA EXPOSTA AO MEIO.....	25
FIGURA 2 - PERSPECTIVA TRANSVERSAL BLOCO SOLO-CIMENTO	28
FIGURA 3 - FOTOGRAFIA DE BLOCOS DE ALVENARIA DE SOLO-CIMENTO.....	29
FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PREPARADOS A PARTIR DE TIJOLOS MACIÇO E VAZADO COM DUAS METADES INVERTIDAS SUPERPOSTAS.	30
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO ESTATÍSTICO EM UM EXPERIMENTO DCCR, EM DOIS NÍVEIS COM TRÊS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	31
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA.....	34
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DO LODO DA ETA. (1) - LODO SECANDO EM CONDIÇÕES NATURAIS DE TEMPERATURA E PRESSÃO. (2) - EQUIPAMENTO DE TRITURAÇÃO DAS PARTÍCULAS ATRAVÉS DE IMPACTOS. (3) - PENEIRA UTILIZADA PARA OBTENÇÃO DO MATERIAL FINAMENTE DIVIDIDO. (4) - LODO FINAMENTE DIVIDIDO A PARTIR DA TRITURAÇÃO E PENEIRAMENTO.	37
FIGURA 8 – FOTOGRAFIA DO SAIBRO EMPREGADO NA PRODUÇÃO DO BLOCO DE SOLO-CIMENTO.....	38
FIGURA 9 – (1) MULTIPROCESSADOR ALROMA. (2) ESTEIRA DE TRANSPORTE DO MATERIAL ATÉ A PRENSA HIDRÁULICA.	41
FIGURA 10 - (1); PRENSA AUTOMÁTICA ALROMA, UTILIZADA PARA FABRICAÇÃO DOS BLOCOS. (2); PERSPECTIVA DA FORMA DE PRENSAGEM DOS BLOCOS SOLO-CIMENTO.	45
FIGURA 11- (1) PROCESSO DE CURA ÚMIDA; (2) CURA AO TEMPO.....	45
FIGURA 12 - PROCESSO DE PREPARAÇÃO DOS TIJOLOS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES: (1) CORTE DOS TIJOLOS; (2) TIJOLOS CORTADOS AGUARDANDO A PRÓXIMA ETAPA.	46
FIGURA 13 - PREPARO DA PASTA DE CIMENTO EM MESA DE VIDRO PARA O CAPEAMENTO.....	47
FIGURA 14 - CORPOS DE PROVA NO TANQUE AGUARDANDO IMERSÃO.....	48
FIGURA 15 - FOTOGRAFIA DO BLOCO DE ALVENARIA DE SOLO-CIMENTO COM RESÍDUOS INORGÂNICOS NA SUA COMPOSIÇÃO SENDO SUBMETIDO AO ENSAIO DE AVALIAÇÃO DA SUA RESISTÊNCIA MÁXIMA DE RUPTURA.....	48
FIGURA 16 – ESTUFA ECAMO	49
FIGURA 17 - MOLDAGEM DAS MASSAS UMEDECIDAS EM FORMATO ELIPSOIDAL	55

LISTA DE ABREVIATURAS

Fev. Fevereiro

Jul. Julho

Jun. Junho

Out. Outubro

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
CC	Construção Civil
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Cimento Portland
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
ME	Método de Ensaio
MPa	Mega Pascal
MT	Mato Grosso
NBR	Norma Brasileira
NM	Número
RS	Resistente a Sulfato
SiO ₂	Dióxido de Silício
SO ₃	Óxido Sulfúrico
ETA	Estação de Tratamento de Água
ECO - 92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, 1992
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
ANOVA	Análise de Variância
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ISO	Organização Internacional de Normalização

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Adição de Escoria
F	Adição de Filer
X_1	Variável Lodo
X_2	Variável Cimento
Y_1	Resposta para Absorção de Água
Y_2	Resposta para Resistência Mecânica
Z	Adição Pozolânica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Geral.....	20
2.2	Específicos	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1	Sustentabilidade e Processo de Reciclagem dos Materiais.....	23
3.1.1	O processamento para reutilização do lodo de ETA.....	23
3.2	Fabricação do Cimento	26
3.3	Fabricação do Bloco de Alvenaria de Solo-Cimento com Resíduos	27
3.4	Capeamento	29
3.5	Planejamento Fatorial	30
4	METODOLOGIA	33
4.1	Considerações Iniciais	33
4.2	Equipamentos Utilizados	35
4.3	ETAPA I – Estudo dos Referenciais Teóricos.....	35
4.4	ETAPA II – Coleta, Preparo e Caracterização dos materiais.	36
4.4.1	Processamento do lodo de ETA.....	36
4.4.2	Ensaio de massa específica	38
4.4.3	Ensaio de granulometria	38
4.4.4	Módulo de finura e dimensão máxima.....	39
4.4.5	Limite de escoamento e plasticidade	39
4.4.6	Análise laudo analítico.....	40
4.5	ETAPA III – FABRICAÇÃO DOS BLOCOS ECOLÓGICOS.....	40
4.5.1	Prensagem	44
4.6	ETAPA IV – ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICOS DOS BLOCOS PRODUZIDOS	46
4.6.1	Avaliação da absorção de água nos blocos de alvenaria.....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	A Transformação de Resíduos em Matéria Prima e suas Características.....	50
5.2	A Fabricação dos Blocos de Alvenaria de Solo-Cimento e as Implicações da Substituição do Solo por Resíduos	56
5.2.1	Fabricação de blocos de alvenaria através da substituição de solo por combinações de resíduos: Planejamento Fatorial.....	57
5.3	A Situação dos Blocos: Quais os Candidatos a Produto.....	66

6	CONCLUSÕES	70
7	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com aproximadamente 214 milhões de habitantes, é classificado como um país emergente e amplo ao desenvolvimento e pesquisa (IPEA, 2022). Considerando à constante demanda de construção de novas moradias, visto o aumento populacional, o presente trabalho oferece soluções ambientalmente mais adequadas para o desenvolvimento da Construção Civil (CC), através da reutilização de resíduos com a produção de blocos de alvenaria de solo-cimento com características mais sustentáveis.

O desenvolvimento de blocos de alvenaria com resíduos inorgânicos na sua composição para serem empregados em alvenaria de vedação, apresenta-se como uma oportunidade na mitigação tanto do problema habitacional, quanto do problema ambiental (BATISTA *et al.*, 2017). O estudo de composições pulverulentas resultantes da mistura de solo, resíduos inorgânicos e aglomerantes têm possibilitado à produção de blocos de alvenaria. A substituição parcial do solo arenoso por uma combinação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) permite a produção de blocos de alvenaria menos prejudiciais ao meio-ambiente (ALVARENGA, 2019).

O lodo de ETA do município de Palmas – TO, ETA-006, é constituído predominantemente de sulfato de alumínio hidratado e outros empregando-os como matéria prima para produção de blocos de alvenaria de vedação.

O estudo de algumas características mecânicas desses blocos, em função do grau de substituição da matéria prima *in natura* por uma combinação de resíduos, possibilita a diminuição de problemas ambientais e habitacionais. Ou seja, elementos como: o desenvolvimento de processos tecnológicos capazes de gerar essa transformação de resíduos em matéria-prima, a aplicação da ferramenta de planejamento fatorial e a avaliação da correlação entre a resposta das propriedades mecânicas destes blocos, frente aos diferentes teores de resíduos na fabricação do mesmo, se analisados dentro de uma pesquisa voltada a esse campo pode nos trazer composições que não percam o índice qualitativo desses blocos.

Um bom ponto de partida e uma das propostas que mais avançam nesse sentido são as alvenarias de solo-cimento, sendo estas conhecidas comercialmente como tijolos ecológicos. Esses blocos de alvenaria são prensados hidraulicamente e não necessitam de queima a altas temperaturas em fornos, que normalmente utilizam como combustível a madeira, que normalmente provém de fontes não sustentáveis.

Apresentam-se, aqui, possibilidades reaproveitamento de resíduos inorgânicos e suas misturas na CC (FERRAZ, 2014), neste caso em questão, o lodo proveniente das ETAs. Este material, misturado ao solo arenoso, cimento e água, após prensagem hidráulica possibilitam a formação de um bloco de alvenaria (tijolo ecológico).

Esse lodo é o resultado diário do processo de tratamento da água que consumimos. Em uma cidade de aproximadamente 300 mil habitantes, cerca de 600 toneladas de lodo de sulfato de alumínio são geradas anualmente. Boa parte está estocada nos pátios das empresas responsáveis pelo tratamento ou de suas afiliadas. Reconhece-se que práticas questionáveis têm sido empregadas como forma de mitigação desse problema, dentre elas a mistura com o solo e esgoto. Contudo, a criação de políticas específicas e o monitoramento tem evitado o descarte *in natura* nos rios (DOS REIS, 2007).

Consideram-se aqui os estudos e discussões que promoveram campanhas educacionais envolvendo Reuso, Reciclagem e Redução (3R's), que, posteriormente foi ampliada para 5R's, com uma mudança significativa de conceito, sendo que a principal diferença está fundamentada na redução do consumo e no reaproveitamento de materiais em detrimento da reciclagem (DE LIMA, 2009). Logo, é plausível pensar no fim da inércia química de produtos inorgânicos utilizados em larga escala, como o sulfato de alumínio que gera o lodo da estação de tratamento.

Consoante a esse princípio, e as necessidades de aprimoramento de processos e produtos relacionados à CC, intencionou-se estudar substituição de uma mistura de lodo de pô solo em blocos de alvenaria de solo-cimento através de sua incorporação dentro da fabricação dos blocos, considerando-se os dois períodos de tempo em que ele pode ser extraído: o de estiagem e o chuvoso.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos de solo-cimento com incorporação de lodo residual das ETAs, considerando os blocos tradicionais já existentes em dois períodos climáticos distintos, o de estiagem e o chuvoso, almejando, assim, obter a variável com melhor custo benefício sem mudar características funcionais do bloco ou sua qualidade.

2.2 Específicos

1. Observar as interações entre as variáveis quantitativas de materiais e sua substituição por outros, advindos do lodo das ETAs, em prol da fabricação de um bloco de alvenaria de qualidade semelhante aos já existentes, aliados a uma readequação dos materiais outrora descartados almejando preservação e sustentabilidade.
2. Formular uma mistura de solo, cimento e lodo de ETA a contemplar o maior percentual de substituição de solo por resíduos e a menor quantidade de cimento capaz de produzir blocos de alvenaria com resistência mecânica à compressão de 2,2 MPa ($\pm 0,2$).
3. Aperfeiçoar a substituição de solo por lodo para fabricar um produto adequado e sustentável para à cadeia da CC a partir dos resultados do planejamento fatorial.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O tema sustentabilidade, desde a sua concepção, tem atraído uma série de iniciativas, estudos e propostas de ação (BECKERMAN, 1994). O conceito de desenvolvimento sustentável vem se consolidando desde a realização da conferência ECO-92, realizada no Rio de Janeiro, Brasil, sendo fruto de ações iniciadas vinte e um anos antes, na conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, em Founex, Suíça. Nesta conferência surge, pela primeira vez, o termo sustentável. Um ano após a conferência organizada pelo Painel das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (PNUMA) em Estocolmo, iniciam-se de forma organizada e conjunta debates sobre os modelos vigentes a época sobre o desenvolvimento econômico e o modelo sustentável (HERCULANO, 1994), que possuem uma relação intrínseca quando levamos em consideração que a preservação da natureza é um elemento essencial para que a própria existência humana se permita. Estas discussões aprofundam-se na Declaração de Cocoyoc, que lançava a perspectiva de um modelo baseado na releitura da teoria Neomalthusiana avaliando a explosão demográfica e o consumo de recursos naturais, considerando não apenas o controle populacional, mas também as questões em que se encontra o Estado e, em como ele, pode tornar-se uma ferramenta de preservação do social.

Basicamente, o conceito de sustentabilidade empregado atualmente está associado a diferentes dimensões, tais como a ecológica, econômica, social e cultural, que são decorrentes da atividade humana. Contudo, estas dimensões estão intimamente ligadas e devem ser observadas em função da sua articulação com as propostas que se encontram em desenvolvimento e que buscam alinhar-se com estes conceitos. De maneira geral, percebe-se que na maior parte este conceito tem sido abordado como o resultado apenas das dimensões econômica e ecológica, sendo as dimensões social e cultural negligenciadas na maioria dos casos de sustentabilidade (NEWMAN, 2008). O que, de certa forma, não é implausível. Considerando que a dimensão econômica é quem predomina na maioria das relações dentro da sociedade em que estamos, caberia a ela uma participação e interesse maior dentro do contexto de preservação, para que ela possa não só se beneficiar, mas também preservar o meio que a fornece a matéria necessária para a construção de suas mercadorias.

A preocupação com o grave problema da geração e destinação dos resíduos vem, cada vez mais, despertando a conscientização da necessidade de realização de estudos e norteadas ações de reciclagem, reaproveitamento e redução do consumo com vistas a melhorar o ciclo de produção e adequar a destinação dos resíduos gerados (ALMEIDA *et al*, 2017). O ato de

somente descartar não é mais visto com naturalidade e nem viável. Considerando-se que os processos de incineração e de disposição em aterros sanitários apresentam problemas latentes para a população e o meio ambiente (diminuição da qualidade de vida, destruição de ecossistemas), cabe a aplicação de modos que se utilizem de reaproveitamento dos materiais para que não haja desperdício ou danos.

Atualmente, a sustentabilidade é um dos temas que mais tem sido abordado por todo o mundo e por motivos lógicos. Desde a revolução industrial, processos industriais que facilitem a criação de produtos em larga escala se tornaram comuns. A necessidade de obtenção de matéria-prima, de forma rápida, para a confecção de produtos industrializados tornou-se um fator importante. Extrair tornou-se uma questão que urgia de pesquisas, mas a reposição dos materiais e do que realizar com suas sobras não. Havia uma necessidade de repensar o processo como um todo, pois, se continuasse a seguir na mesma linha de atuação, sem nenhum tipo de consideração com o meio e com os indivíduos, em determinado ponto ele sucumbiria. Esse fenômeno já havia sido notado em análises anteriores, antes de se tornar um tópico central no século XXI. No relatório preparatório da reunião da Comissão de Desenvolvimento e Meio Ambiente da América Latina e Caribe já é possível notar a necessidade de que os processos de fabricação sejam repensados:

Os modelos de desenvolvimento que prevalecem no mundo e que produziram ganhos importantes para o desenvolvimento humano por várias décadas demonstram sinais irrefutáveis de crise. [...] a configuração dos problemas ambientais ameaça a capacidade de manter este processo de desenvolvimento humano em médio e longo prazo. (CDMAALC, 1991, p.2)

Não que os processos industriais, da forma como estavam estabelecidos e trabalhavam, não tivessem trazido suas contribuições, mas a necessidade de preservar o sistema natural era crucial para a manutenção da própria vida. Foi o desenvolvimento industrial que permitiu a criação de cidades e o estabelecimento das sociedades que hoje vemos. Caberia a ele então, possibilitar a manutenção sadia desse meio.

E é, nesse contexto, que podemos trabalhar uma relação que se apresenta de forma condizente com a pesquisa: a necessidade de aperfeiçoamento da produção em sintonia com a preservação do meio ambiente. Um dos processos atualmente mais utilizados e que gera grande quantidade de resíduos é o do tratamento da água encanada (HOPPEN, 2005), elemento característico dos centros urbanos. Atualmente, o lodo produzido nessas ETAS não tem descarte

adequado e ficam armazenados no pátio da concessionária. Logo, utilizar do lodo que é produzido pelas ETAS dentro da própria confecção dos materiais utilizados na CC seria uma amostra de relação consciente dentro da perspectiva de reaproveitamento.

3.1 Sustentabilidade e Processo de Reciclagem dos Materiais

As implicações do desenvolvimento de tecnologia apropriada à transformação desses resíduos, lodo, podem criar um cenário favorável a introdução de resíduos como ativos ambientais. Isso reforça toda a cadeia de reciclagem e reutilização, permitindo que cooperativas e associações de catadores de materiais reciclados possam ser fornecedores de matéria-prima. Todavia, o processamento deve ser realizado por uma empresa com conhecimento técnico, capacidade de produção e visão de futuro. O presente estudo desenvolvido permite sonhar com esse cenário.

3.1.1 O processamento para reutilização do lodo de ETA

O tratamento de água é indispensável para a vida nas cidades, desde as menores até as maiores. Este processo consiste basicamente das etapas de remoção de sólidos por gradeamento, aeração, correção do pH, floculação, cloração e fluoretação (KOS,2017). Nesse processo contínuo, a etapa de floculação, é responsável pela transferência de fase dos resíduos sólidos, que se encontram suspensos na água para uma outra fase sólida, chamada de lodo. Este lodo se deposita no fundo dos tanques de sedimentação sendo removidos por dragagem com a utilização de bombas hidráulicas. Este produto produzido cotidianamente torna-se o grande gerador de resíduo sólido que na maior parte dos casos constitui-se em um passivo ambiental, tornando-se um crescente problema de gestão de resíduos sólidos nas empresas responsáveis pelo tratamento de água (ANDREOLI, 2014).

O processo de coagulação é sucedido da floculação dos sedimentos suspensos na água a ser tratada que são mediados em condições do pH alcalino na presença de compostos de alumínio, tal como sulfato ou cloretos (ALMEIDA *et al.*, 2017). Ainda também há a possibilidade de utilização de compostos de íon ferro com valência +3. Todavia, os compostos mais largamente empregados no processo de tratamento da água utilizam o sulfato de alumínio como coagulante em função do seu custo operacional (SALES e CORDEIRO, 2015).

Há um amplo espectro de partículas suspensas na água a ser tratada. Essas partículas variam de acordo com a sua natureza, podendo ser orgânicas e inorgânicas. As partículas orgânicas que se encontram dispersas, ou seja, tanto na forma coloidal como na forma de suspensão bactérias e algas, são chamadas de zooplacton. A remoção dessas partículas é indispensável em função do tipo de problemas à saúde que proporcionam. A criptosporidiose é uma doença causada pelos protozoários *Cryptosporidium* e *Giardia* que afetam o trato gastrointestinal, principalmente de pessoas imunodeprimidos. A resistência química da membrana dos oocistos ao tratamento por cloração exige que este tipo de impureza seja removido antes dessa etapa nas estações de tratamento (BESERRA, 2010). As partículas inorgânicas que se encontram dispersas na água também possuem uma faixa de distribuição granulométrica acima de 1 micron. Contudo, a sua natureza é extremamente diferente. Basicamente essas partículas inorgânicas são areia (dióxido de silício) e argila, que pode ser a caulinita, montmorilonita, illita e moscovita (GÖMZE,2018). Fundamentalmente essas partículas dispersas em água afetam a sua turbidez, o que torna a água imprópria para consumo humano.

A remoção por coagulação, seguida da floculação das partículas dispersas em água, na ETA-006, em Palmas, é feita por adição controlada de sulfato de alumínio em solução em pH básico. O mecanismo dessa floculação é intermediado pela supressão da carga elétrica das partículas coloidais oriunda da diminuição da dupla camada elétrica, que nesse caso afeta a sua estabilidade permitindo que a força peso predomine sobre o efeito eletro-cinético que mantém as partículas em suspensão, promovendo assim a sua floculação. A extensão da dupla camada elétrica bem com a sua força depende da quantidade de íons adsorvidos na superfície das partículas sólidas, que se encontram em suspensão. Normalmente, estas partículas possuem cargas negativas sobre a sua superfície e isso justifica a sua dispersão em um meio polar (água). Assim, as interações de natureza adsortiva e desortivas ocorridas entre os íons presentes na água e a sua interação com a superfície das partículas restringem a extensão da força elétrica propagada radialmente a partir da superfície das partículas em suspensão. Este efeito resulta na diminuição dessa força de natureza elétrica, que pode ser entendida através de uma compactação, o que resulta na camada de Stern. Com isso, quando partículas em suspensão interagem entre si por manifestação dos seus dipolos, acabam por atrair íons positivos, principalmente, o alumínio com valência +3 presentes no sulfato de alumínio usado como agente coagulante. Este fato promove a formação de uma camada elétrica difusa (OHSHIMA,

2018). Os efeitos proporcionados pela sobreposição da camada de Stern com a camada difusa são os geradores da dupla camada elétrica.

As opções encontradas até o momento para destinação desses resíduos sólidos são incineração, disposição em aterros ou nos pátios das empresas geradoras e também na agricultura, que se destaca com uma absorção de cerca de 55% do volume desse material produzido (EPA, 2000). Todavia, a CC apresenta-se como uma via alternativa a utilização desses resíduos. Atualmente, existem inúmeros trabalhos mostrando a possibilidade do emprego desses resíduos para fabricação de produtos para CC (SILVA, 2011). Um dos exemplos de mitigação desse problema está no reaproveitamento desse lodo, Figura (1), na indústria de materiais cerâmicos, com vistas a diminuição da utilização de matéria-prima *in natura* (PAIXÃO, 2008).

Figura 1 - (1) Fotografia do sistema de drenagem de água e retenção do Lodo de ETA no *bag*. Ao fundo um *bag* semipreenchido de Lodo; (2) Armazenagem do Lodo de ETA contido em uma pilha para transporte; (3) Fotografia da superfície do Lodo de ETA exposta ao meio.



Fonte: Acervo do Autor

3.2 Fabricação do Cimento

Em 1756 o Inglês John Smeaton criou uma mistura resistente através da calcinação de calcários moles e argilosos, que foi a base para descoberta do cimento, décadas depois. O cimento é composto fundamentalmente pelo clínquer, apresentando diversas propriedades mecânicas e químicas dependendo de suas adições (ABCP, 2018).

Ainda de acordo com a ABCP (2018), dependendo da proporção entre o clínquer, sulfato de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, pode-se ter vários tipos de cimento, que são:

- Cimento *Portland* Comum (CP I) pode conter adição (CP I-S), neste caso, de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou filer calcário e o restante de clínquer.
- Cimento *Portland* Composto (CP II- E, CP II-Z e CP II-F) tem adições de escória, pozolana e filer, respectivamente, mas em proporções um pouco maiores que no CP I-S.
- Cimento *Portland* de Alto-Forno (CP III) e o Cimento *Portland* Pozolânico (CP IV) contam com proporções maiores de adições: escória, de 35% a 70% (CP III), e pozolana de 15% a 50% (CP IV).

Tendo em vista que um dos resíduos utilizados para fabricação dos blocos de solo-cimento têm sulfatos, é necessário obter um cimento resistente a tal, pois, o aumento de pozolana reduz as reações no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos (ITAMBÉ, 2018). Esse tipo de cimento possui baixo calor de hidratação e são resistentes a sulfato oferecendo características de melhor durabilidade, pois, suas adições o tornam mais impermeável e resistentes a meios agressivos com presença a sulfatos (SECIL, 2018).

Cimento de resistência a sulfatos tem como composição baixo teor de C_3A para evitar o ataque externo ao concreto ou então a formação de sulfoaluminato de cálcio e gipsita pode causar a desagregação do concreto devido ao maior volume dos compostos resultantes. Os sais mais ativos são os sulfatos de magnésio e sódio, para alcançar tais resistências o teor de C_3A é limitado a 3,5%, e o teor de SO_3 é limitado a 2,5%, demais devem atender o cimento Portland comum (NEVILLE, 2013).

3.3 Fabricação do Bloco de Alvenaria de Solo-Cimento com Resíduos

Solo-cimento é um material obtido pela mistura de solo, cimento e água. Segundo Mercado (1991), é um processo físico-químico de estabilização, onde as partículas sólidas são reorientadas na sua estruturação com a deposição de substâncias cimentantes nos contatos inter granulares, mudando as quantidades relativas que constituem o solo.

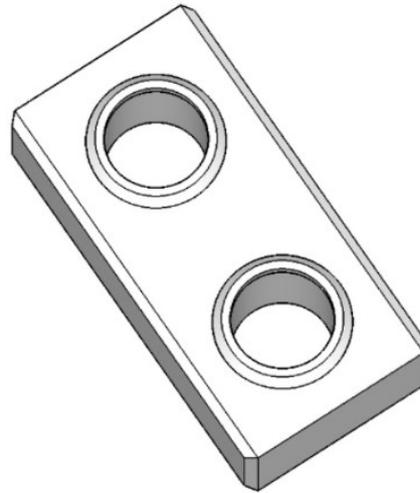
Caputo (2015) destaca que os principais motivos que afetam a qualidade do solo-cimento são o tipo de solo, o teor de cimento, o método de mistura e a compactação. Sendo que desses o solo exerce a maior influência. Podendo então, dependendo do solo escolhido, não apresentar nenhuma resistência ou dificuldade na moldagem, assim, necessitando de maior teor de cimento, aumentando o custo do bloco.

Para obter um solo-cimento satisfatório a compactação e homogeneidade é essencial, para isso é necessário ter controle de qualidade na mistura do traço do material e é preciso conhecer a influência do teor de umidade na compactação, para garantir que o material atinja o melhor peso específico possível que está diretamente relacionado com a resistência mecânica.

Sala (2006) destaca que o tijolo ecológico ou de solo-cimento não exige queima, sendo assim, um material ecologicamente correto por evitar desmatamento e não poluição do ar, por não lançar resíduos tóxicos no meio ambiente. Outro fator importante são que “(...)o sistema construtivo dos tijolos ecológicos traz para a obra, de 20 até 40% de economia com relação ao sistema construtivo convencional” (SEBRAE, 2018). Sendo esses o motivo pelo qual foi optado pela fabricação de bloco ecológico solo-cimento.

O bloco de solo-cimento possui dois furos verticais que possibilita a passagem de dutos de saneamento e eletrodutos tendo então uma construção mais limpa e ágil, pois, não é preciso o recorte da alvenaria para essas passagens. Além disso, esses blocos possuem rebarbas para melhorar o encaixe entre eles, possibilitando uma melhor distribuição do carregamento da estrutura, como mostra a Figura (2).

Figura 2 - Perspectiva transversal bloco solo-cimento



Fonte: Acervo do Autor

O tijolo ecológico apresenta, além de praticidade, muita economia por ser um bloco com resistência superior aos blocos de vedações comuns, assim, suportam maiores carregamentos. Seus furos podem ser utilizados para preenchimento de concreto para criação de graute¹, possibilitando ainda um aumento na resistência do material e usando o próprio bloco como forma, com isso tendo o consumo de madeira para criação das formas quase nulo.

Apesar dos benefícios citados para o uso do bloco de solo-cimento, sua utilização ainda é muito baixa por falta de conhecimento e com a entrada de muitos outros blocos no comércio brasileiro, onde esses métodos sustentáveis ainda estão em desenvolvimento cultural e tecnológico, assim prejudicando a entrada de novos produtos.

De acordo com Carvalho e Poroça, apud Carneiro (1995), as alvenarias construídas de blocos solo-cimento têm comportamentos superior ou equivalente aos blocos cerâmicos com boa durabilidade e comportamento térmico. Porém, os blocos de solo-cimento, Figura (3), podem ser utilizados como blocos de alvenaria estrutural, desde que atendendo às resistências mínimas.

¹ É um tipo específico de concreto, indicado para preenchimento de espaços vazios dos blocos e canaletas, com o objetivo de solidarização da armadura e aumentar a capacidade portante.

Figura 3 - Fotografia de blocos de alvenaria de solo-cimento.



Fonte: Acervo do Autor

3.4 Capeamento

De acordo com Rudiant (2006), o capeamento é uma técnica em que se usa um material moldável capaz de formar uma camada sem irregularidades nos topos dos corpos de prova, diz ainda que o mesmo deve ter resistência e propriedades elásticas semelhantes às propriedades do corpo-de-prova ensaiado.

Corpos-de-prova ao serem levados para o ensaio a compressão deve-se fazer um tratamento em suas faces opostas nas quais irão receber os esforços provenientes do carregamento. Normalmente as faces a serem ensaiadas devem ser aquelas que receberam o carregamento durante o seu uso, por apresentarem irregularidades em seus topos com frequência, levando então em concentração de carga em determinados pontos (MARCO, 2002).

Para que ocorra uma distribuição uniforme de tensão as extremidades dos blocos devem ser tratadas, por um capeamento homogêneo e isotrópico; evitando uma diminuição da resistência devido à excentricidade (VIERA, 2008).

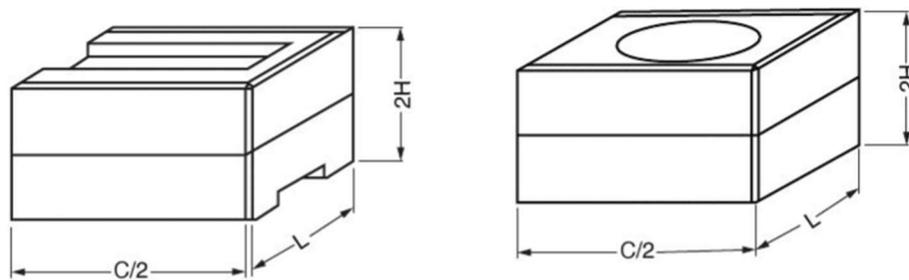
De acordo com a NBR 8492:2012, o capeamento deve ser plano e sua espessura não ultrapassar 3 mm, ainda descreve como os corpos-de-prova devem ser preparados:

- a) cortar o tijolo ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão;
- b) superpor, por suas faces maiores, as duas metades obtidas e as superfícies cortadas invertidas, de acordo com a Figura (4), ligando-as com uma camada fina de pasta de

cimento Portland, pré-contraída (repouso de aproximadamente 30 min). Com 2 mm a 3 mm de espessura, e aguardar o endurecimento da pasta. A resistência da pasta de cimento não pode ser menor que a do tijolo em ensaio;

- c) quando o tijolo apresentar rebaixo, superpor suas duas metades de modo que as reentrâncias fiquem localizadas na fazes de trabalho do corpo de prova e encher as reentrâncias com pasta de cimento Portland, aguardando aproximadamente 12h antes de proceder à etapa seguinte;

Figura 4 – Ilustração dos corpos de prova preparados a partir de tijolos maciço e vazado com duas metades invertidas superpostas.



Fonte: ABNT NBR 8492:2012.

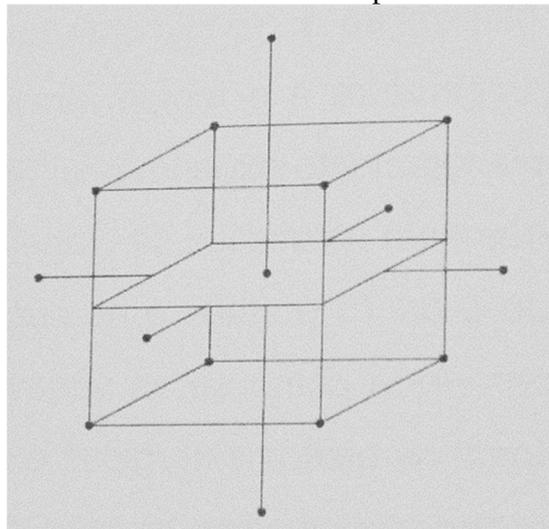
3.5 Planejamento Fatorial

O trabalho em questão se propõe ao desenvolvimento de um bloco de alvenaria de solo-cimento, obtido a partir da mistura de materiais, dentre eles resíduos de lodo de ETA, além de cimento, solo e água. O desenvolvimento de um produto, como é o caso desse bloco de alvenaria com a adição de resíduos, deve ser estudado a partir de uma fundamentação teórica, que permita uma otimização do produto bem como do processo que lhe deu origem. Essa abordagem tem como princípio o planejamento fatorial. Em função dessa escolha metodológica, é possível a avaliação das superfícies de respostas dos experimentos contemplando o efeito das variáveis sobre o resultado de uma propriedade (ou mais de uma) que se tem interesse em estudar, e ainda aspectos sinérgicos ou antagônicos produzidos pela sua interação. Esses resultados podem ser analisados a partir das figuras de mérito, geradas a partir de um conjunto de experimentos, proveniente do processo de otimização. Assim, essa é ferramenta mais apropriada do que as baseadas no empirismo ou tentativa e erro utilizadas para análise das variáveis do produto e do processo (RODRIGUES e IEMMA, 2006). A utilização dessa ferramenta possibilita avanços

significativos na pesquisa, pois acaba refletindo sobre os custos de produção, tempo de processo, rendimento e qualidade dos produtos.

A substituição do solo por resíduos deu-se de forma o estudo de uma variável por vez mantendo as condições fixas para as outras variáveis do processo. Apesar de ineficiente, se analisado em relação ao esforço para produzir as amostras a serem estudadas e qualidade dos resultados a partir da sua análise. 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, Figura (5), em estudos envolvendo o planejamento estatístico ou planejamento experimental fatorial (GONTIJO NETO, T.M. *et al.*, 2018).

Figura 5 - Representação do espaço estatístico em um experimento DCCR, em dois níveis com três variáveis independentes.



Fonte: RODRIGUES e IEMMA, 2006.

Esse Delineamento Composto Central Rotacional - 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 das figuras de mérito a partir das superfícies de respostas obtidas (RODRIGUES e IEMMA, 2006).

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

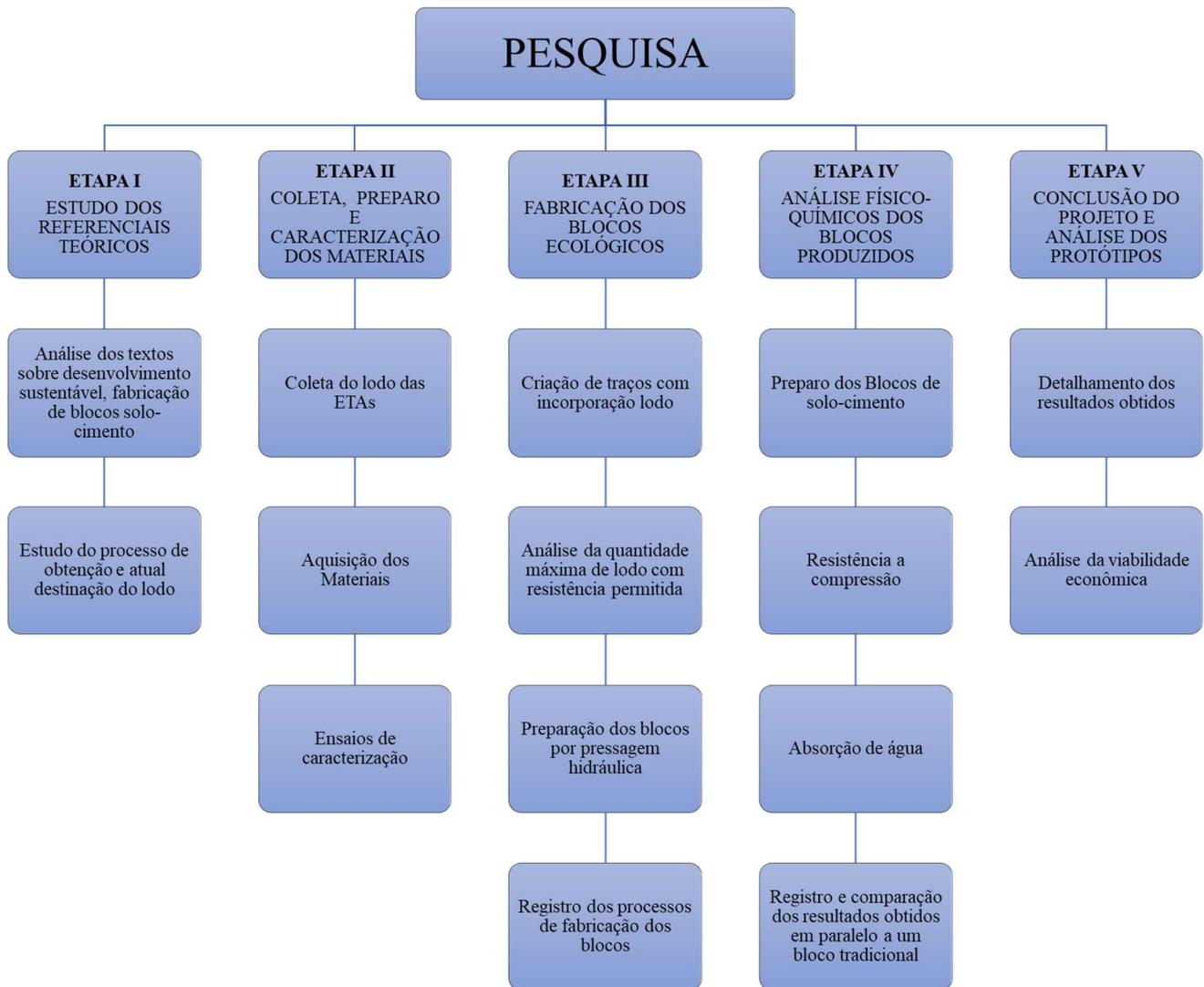
próprios blocos de alvenaria. Os parâmetros investigados a partir do processamento dos materiais empregados no processo, bem com a experiência adquirida do desenvolvimento de etapas anteriores no processo e o bom senso, permitiram a criação de um cenário propício a otimização das variáveis e à criação das superfícies de respostas (GONTIJO NETO, T.M. *et al.*, 2018).

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de produção da pesquisa em questão. Conforme ilustrado no fluxograma da Figura (6), a pesquisa foi dividida em 5 (cinco) etapas. A ETAPA I consistiu no estudo dos referenciais teóricos, onde se observaram trabalhos que poderiam contribuir ou influenciar, direta ou indiretamente, a produção da pesquisa. Esse momento teve-se à leitura de textos sobre desenvolvimento sustentável, fabricação de blocos ecológicos e análises financeiras. Na ETAPA II foi realizada a coleta, preparo e caracterização dos resíduos gerados na estação de tratamento em estudo. Durante a ETAPA III foram executados os ensaios de modelagem tipo DCCR para definição das condições otimizadas dos traços para a fabricação dos blocos no Laboratório de Concreto e Materiais IFTO. A ETAPA IV refere-se à análise físico-químico dos blocos produzidos, tendo como parâmetros a resistência, a compressão e a absorção de água. Por fim, na ETAPA V, foi realizada a modelagem do traço ideal, obtido através da análise dos protótipos, após comparações quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos durante todo o processo de pesquisa. Considera-se também as relações climáticas da região de Palmas, no Tocantins, durante os períodos em que foram realizados os testes. Dado que as necessidades de obtenção das informações precediam duas variáveis, os períodos de estiagem e o período chuvoso, as obtenções de materiais tiveram de obedecer os princípios de mudança climática que na região se dividem em duas fases: a de estiagem, que corresponde aos meses de abril a outubro; e a de maior índice pluviométrico, que corresponde os meses de novembro a março. (NIMER, 1979)

Figura 6 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa



Fonte: Acervo do Autor

4.2 Equipamentos Utilizados

Na Tabela 1 apresentam-se às especificações e a função dos equipamentos utilizados na pesquisa.

Tabela 1 – Equipamentos utilizados na pesquisa

EQUIPAMENTOS	FUNÇÃO NA PESQUISA
Britador de Mandíbula I-4198, marca PAVITEST	Diminuir o tamanho das partículas a partir de impactos de eixo horizontal.
Balança eletrônica AC 10K – marca Marte	Pesagem dos materiais.
Multiprocessador 400L - Mod. 2015 - Marca Al Roma	Misturar os Materiais.
Prensa Automática 150 bar 10cv, marca ALROMA	Produção dos blocos ecológicos
Balança digital AD5000-R - marca Marte	Pesagem de materiais.
Máquina universal de ensaios 10.000, microprocessada, carga máxima de 2000 kN, marca EMIC	Ensaio de avaliação da sua resistência máxima de ruptura.
Estufa EES-283D - marca Vulcan	Ensaio de absorção de água.

Fonte: Acervo do Autor

4.3 ETAPA I – Estudo dos Referenciais Teóricos

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, e conseqüentemente gerando uma quantidade maior de lodo, entretanto, o período de estiagem no município de Palmas no estado do Tocantins ocorre entre os meses de abril a outubro, há uma redução da necessidade desses produtos, e acredita-se que conseqüentemente uma produção reduzida de lodo de ETA.

O presente trabalho trata-se de pesquisa aplicada. Buscou-se estudar através de experimentos controlados o efeito da substituição parcial do solo arenoso, em blocos de alvenaria de solo-cimento por uma combinação dos resíduos inorgânicos: lodo de ETA. A pesquisa desenvolveu-se em duas formas comparativas. A primeira forma levou em consideração o lodo retirado da ETA no período de estiagem, compreendido entre os meses de abril a outubro. A segunda no período chuvoso, compreendido entre os meses de novembro e fevereiro.

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

A análise quantitativa encontra-se amparada em análise estatística. A análise estatística dos resultados foi obtida a partir de um delineamento experimental composto rotacional (DCCR) para 2 variáveis (RODRIGUES e IEMMA, 2006).

4.4 ETAPA II – Coleta, Preparo e Caracterização dos materiais.

Os materiais empregados nesses estudos foram adquiridos por meio de doação, cooperação técnica e compra direta. O lodo de ETA foi doado exclusivamente pela empresa concessionária de tratamento de água do Município de Palmas/TO. O cimento foi adquirido através de recursos próprios.

Os materiais obtidos sob a forma de doação, empregados no presente estudo, passaram por etapas de processamento. Este processamento teve como objetivo a adequação do material ao estudo e basicamente estava relacionado à diminuição e controle do tamanho das partículas.

4.4.1 Processamento do lodo de ETA

O lodo foi coletado na Estação de Tratamento de Água do município de Palmas – TO a ETA-006 com autorização da concessionária local, sendo ela a responsável pela distribuição de água tratada para a capital. O lodo foi coletado diretamente nos *bags* geotêxtis que o retém, tendo sido retirados aproximadamente 12m³ deste material. O lodo foi transferido para o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), colocado em pilha a seco sob temperatura ambiente Figura (7-1). Após a secagem do material, ele foi conduzido a um britador para a diminuição do tamanho das partículas através de impactos de eixo horizontal, como pode ser visto na Figura (7-2), onde seu diâmetro foi reduzido. Após a passagem desse material, ele foi conduzido a uma peneira circular de 1,4 mm, Figura (7-3), gerando um pó finamente dividido Figura (7-4).

Figura 7 - Representação das etapas de processamento do Lodo da ETA. **(1)** - Lodo secando em condições naturais de temperatura e pressão. **(2)** - Equipamento de trituração das partículas através de impactos. **(3)** - Peneira utilizada para obtenção do material finamente dividido. **(4)** - Lodo finamente dividido a partir da trituração e peneiramento.



Fonte: Acervo do Autor

O solo empregado no estudo, Figura (8), foi adquirido através de doação. Como mostrado nos resultados deste trabalho, este solo possui baixa plasticidade e apresenta-se extremamente arenoso. Os materiais foram recolhidos e acondicionados em um recipiente de 200 litros de polipropileno com tampa, usados exclusivamente para essa finalidade.

Figura 8 – Fotografia do saibro empregado na produção do bloco de solo-cimento.



Fonte: Acervo do Autor

Nesta etapa ainda foram caracterizados os resíduos de lodo, de acordo com as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Foram realizados ensaios para determinação da massa específica, massa unitária compactada, massa unitária no estado solto, granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura.

4.4.2 Ensaio de massa específica

Os ensaios de massa específica serviram para relacionar a quantidade de massa total, incluindo os espaços vazios e água, com o volume do material. Usando-se o método do deslocamento de líquido com o auxílio do picnômetro com rolha de vidro, seguiu-se 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 52 – Aparente Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Os ensaios foram realizados com amostras de 60 gramas de cada material. Por serem materiais pulverulentos, obteve-se, por tentativa, a melhor quantidade para realização do ensaio. O ensaio reúne os seguintes dados: massa da amostra, massa do picnômetro mais água, massa do picnômetro mais água com material, massa deslocada e volume do material. Com esses dados conseguiu-se calcular a massa específica e o peso específico.

4.4.3 Ensaio de granulometria

Os ensaios granulométricos foram responsáveis pela classificação dos solos bem como a estimativa de parâmetros para permeabilidade, capilaridade, entre outros. O ensaio foi feito

por série normal e foi realizado conforme as NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica e NBR NM-ISSO 3310-1 – Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos. As peneiras foram agitadas com o auxílio do agitador mecânico associado ao processo manual. Os materiais retidos em cada peneira foram pesados em uma balança digital (AD5000-R) com precisão de 0,01g e os resultados foram registrados e utilizados para a confecção das tabelas de caracterização granulométrica. Com essa tabela foi possível relacionar os valores das porcentagens retidas, retidas acumuladas e passantes. Depois de calculadas a porcentagem de cada fração de material em função do seu processo de retenção/passagem nas peneiras, foi traçado um gráfico em escala semilogarítmica. A partir desse gráfico foi possível estimar a distribuição granulométrica do material.

4.4.4 Módulo de finura e dimensão máxima

O módulo de finura foi utilizado para separar os agregados em lotes do mesmo módulo, a dimensão máxima representa o maior diâmetro de agregado naquela amostra e sua determinação levou em consideração a porcentagem e o peso do agregado presente em cada peneira, conforme definido pela ABNT NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.

4.4.5 Limite de escoamento e plasticidade

Este ensaio teve como objetivo determinar o limite de plasticidade dos solos, normatizados pelo MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, através da DNER – ME 082/94.

Inicialmente, realizaram-se os procedimentos de amostragem especificados na norma NBR 6457/86 – Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Com a amostra preparada e reduzida, realizou-se sua transferência para a cápsula de porcelana e adicionou-se água destilada aos poucos, até se obter uma massa plástica e homogênea. Após a homogeneização, separou-se 20g da amostra para modelagem da massa em forma elipsoidal. A forma foi alcançada através do rolamento da massa com os dedos na face esmerilhada da placa de vidro, aplicando-se continuamente uma pressão constante na massa.

Para que a condição do ensaio fosse satisfeita, foram moldados 5 rolinhos com 3mm de diâmetro e que apresentassem fissuras. Em seguida, determinou-se a massa de todos os corpos de prova, que foram lavados para a estufa. Ao final, determinou-se o teor de umidade de cada porção.

4.4.6 Análise laudo analítico

Realizaram-se análises de sólidos que são importantes para controlar os processos de tratamento de água e efluentes e avaliar à conformidade com os requisitos regulamentares. A análise de teor de sólidos é usada para definir a quantidade de matéria orgânica presente no substrato com potencial para ser biometanizada pelos microrganismos. O teor de sólidos é um parâmetro essencial para caracterização da matéria orgânica a ser biodigerida e está diretamente relacionado com a quantidade de água presente no substrato (excesso ou carência de água) e a quantidade de minerais, sendo expressa em gramas por litro ou porcentagem (Chernicharo, 2007).

O teor de cinzas em alimentos refere-se ao resíduo inorgânico, ou resíduo mineral fixo (sódio, potássio, magnésio, cálcio, ferro, fósforo, cobre, cloreto, alumínio, zinco, manganês e outros compostos minerais) remanescente da queima da matéria orgânica em mufla sob altas temperaturas (500-600°C) (ZAMBIAZI, 2010).

4.5 ETAPA III – FABRICAÇÃO DOS BLOCOS ECOLÓGICOS

O material estudado para fabricação do bloco de alvenaria obtido a partir da incorporação de lodo de ETA teve como cimento empregado, para a realização dos ensaios, o Cimento Portland CPV ARI, já adotado na fabricação dos blocos comerciais, com alta resistência inicial que é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (ABCP, 2018).

Foi utilizado o mesmo tipo de solo na fabricação de todos os blocos de alvenaria de solo-cimento com resíduos inorgânicos em sua composição. Todo o lodo utilizado veio diretamente dos *bags* de retenção instalado na empresa. A capacidade de retenção de lodo varia de aproximadamente 100 a 120 m³ nesses *bags*.

Os materiais sólidos foram pesados em uma balança da marca MARTE, modelo AC 10K, Série 264786. A mistura dos materiais foi realizada em um multiprocessador que é composto por um cilindro de 400 litros com revestimento interno antiaderente (mod. 2015), eixo rotor triturador de alta rotação, peneira vibratória, funil de armazenamento e sistema de concha para carregamento e padronização da dosagem, marca ALROMA, Figura (9). Os materiais foram adicionados separadamente e homogêneos pela agitação da hélice acionada pelo motor. Após 5 minutos de homogeneização dos materiais, introduziu-se à água na mistura e a homogeneização continuou por mais 2 minutos. Após isso, obteve-se uma mistura que foi utilizada na produção dos tijolos.

Figura 9 – (1) Multiprocessador ALROMA. (2) Esteira de transporte do material até a prensa hidráulica.



Fonte: Acervo do Autor

A mistura dos materiais obedeceu a um planejamento fatorial envolvendo à atribuição de duas variáveis independentes em dois níveis codificados distintos. Essas variáveis compreendem a quantidade de lodo de ETA e cimento (MEDEIROS, 2010).

A metodologia empregada foi o Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR), Figura (5). 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 γ respostas (PEREIRA, 2018).

Esse tipo de experimento leva um delineamento conhecido como 2^3 , utilizando o DCCR. Visando preservar à eficiência e robustez da análise dos dados, todas as variáveis analisadas tinham como parâmetro dados de entrada com valores mínimos e máximos necessários que

permitted certain variations, which were studied one by one (GONTIJO NETO, T.M. *et al.*, 2018).

Assim, além dos quatro pontos dos vértices do espaço estatístico somam-se mais quatro traços axiais e três experimentos no ponto central. Nessa abordagem teve-se acesso a um modelo parametrizado de interação das variáveis e a sua influência, robustez estatística e superfícies de resposta otimizadas, analisadas e plotadas pelo site “*Protimiza Experimental Design*”.

Tabela 2 – Comparativo dos níveis codificados e com as variáveis de estudo

Número de Variáveis		2		
Lodo coletado no período de estiagem				
Resíduos	Unidade	-1	0	1
LODO ESTIAGEM (X1)	kg	0,07	1,18	0,28
CIMENTO	kg	0,28	0,40	0,53
Lodo coletado no período de chuva				
Resíduos	Unidade	-1	0	1
LODO ESTIAGEM (X1)	kg	0,07	1,18	0,28
CIMENTO	kg	0,28	0,40	0,53

Fonte: Acervo do autor

A Tabela (2) mostra como os dados de entrada do aplicativo foram colocadas, do seu limite inferior -1, limite superior +1 e o ponto central 0, onde estão expressos os traços empregados na fabricação dos blocos de alvenaria obtidos a partir da mistura dos materiais, tendo o lodo variando até 10% e o cimento de 8% até 17%. Por final escolheu-se quantas variáveis seriam analisadas.

Tabela 3 – Metodologia aplicada

Respostas	2
Nome da Resposta	Unidade
ABSORÇÃO H2O (Y₁)	kg
TENSÃO (Y₂)	kg
Número de experimentos	
Repetições	1
Pontos Centrais	3

Fonte: Acervo do autor

A Tabela (3) representa os Y respostas sendo: absorção de água (Y_1) e a tensão (Y_2), onde escolheu-se qual modelo de cálculo seria utilizado, nesse caso o DCCR com uma repetição e três pontos centrais.

Tabela 4 - Níveis codificados para o experimento DCCR, empregando 2 variáveis independentes.

Traços	Lodo Estiagem ou Chuvoso (x_1)	Cimento (x_2)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: Acervo do autor

Escolhido o método de DCCR o aplicativo gerou um modelo de traços analisados, Tabela (4), com suas variações do limite inferior até o limite superior transformados em quilos. A Tabela (5) apresenta os traços rodados para esse experimento.

Tabela 5 - Traço e porcentagem dos materiais empregados na fabricação dos blocos de alvenaria de solo-cimento com a introdução de resíduos inorgânicos

Traços	Lodo Estiagem / Chuvoso (Kg)		Cimento (Kg)		Solo (Kg)		Humidade	Nº Blocos	Nº Blocos
	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(%)	Previstos	Feitos
1	0,84	1,96	3,36	7,84	37,80	88,24	10	12	11
2	3,36	7,41	3,36	7,41	35,28	77,78	10	12	11
3	0,84	1,96	6,36	14,85	34,80	81,23	10	12	11
4	3,36	7,41	6,36	14,02	32,28	71,16	10	12	11
5	0,00	0,00	4,92	11,71	37,08	88,29	10	12	11
6	4,20	9,09	4,92	10,65	32,88	71,17	10	12	11
7	2,16	4,89	2,40	5,43	37,44	84,78	10	12	11
8	2,16	4,89	7,32	16,58	32,52	73,64	10	12	11
9	2,16	4,89	4,92	11,14	34,92	79,08	10	12	11
10	2,16	4,89	4,92	11,14	34,92	79,08	10	12	11
11	2,16	4,89	4,92	11,14	34,92	79,08	10	12	11

Fonte: Acervo do autor

Sendo necessário para fabricação dos blocos uma totalidade de 23,4 Kg de Lodo Estiagem, 23,4 Kg de Lodo Chuvoso, 107,52 Kg de cimento e 769,68 Kg de solo para fabricação dos blocos ecológicos.

4.5.1 Prensagem

Essas etapas fazem parte do processo da produção dos blocos prensados hidráulicamente, no caso, os blocos de alvenaria de solo-cimento com resíduos na sua composição. Os corpos de prova foram obtidos por moldagem em prensa hidráulica (Prensa Automática ALROMA 150 bar 10cv), Figura (10), sendo utilizada uma pressão de aproximadamente 150kg/cm² por bloco produzido.

Figura 10 - (1); Prensa Automática ALROMA, utilizada para fabricação dos blocos. **(2);** Perspectiva da forma de prensagem dos blocos solo-cimento.



Fonte: Acervo do Autor

Nessas condições de processo, um bloco é prensado a cada 10 segundos. Todavia, considerando as etapas de mistura e pesagem dos materiais, prensagem e cura foram empregados aproximadamente 30 minutos em média por processo, sendo realizado por duas pessoas trabalhando conjuntamente. No entanto, para produzir 3000 blocos são necessárias 2 pessoas durante uma jornada de 8h. Isso, considerando a utilização da mesma prensa.

Após obtenção da plasticidade desejada a massa foi acondicionada em moldes de (27,0 x 9,0 x 12,5 cm), seguindo a NBR-10833 e padronizados pela NBR-10834. Os diferentes corpos de prova receberam cura úmida e posteriormente cura ao tempo, Figura (11) e a sua estabilidade dimensional estimada. Esses blocos somente são considerados prontos ao final de 28 dias.

Figura 11- (1) Processo de cura úmida; **(2)** Cura ao tempo



Fonte: Acervo do Autor

4.6 ETAPA IV – ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICOS DOS BLOCOS PRODUZIDOS

Após 28 dias do início do processo de cura, foi realizado o ensaio de resistência mecânica dos corpos de prova. 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 saibro, uma vez que para que passem pelo ensaio, precisam estar em formato de prisma.

Para o corte dos blocos, (Figura 12-1) 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 retífica eles ficam divididos em duas partes iguais cada como mostra a Figura (12-2).

Figura 12 - Processo de preparação dos tijolos para o ensaio de resistência à compressão simples: (1) Corte dos tijolos; (2) Tijolos cortados aguardando a próxima etapa.



Fonte: Acervo do Autor

Os corpos de prova foram cortados ao meio, sobrepostos e ligados de cimento. Visando à plenitude das faces das peças, procedeu-se o capeamento com pasta de cimento, conforme preconizado pela NBR 8492 (ABNT, 2012). A areia usada para a argamassa do capeamento foi a do laboratório de materiais do IFTO, que foi pesada na (AD500-R) do laboratório, o cimento usado no capeamento foi o Cimento Portland CII F 40, 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 13).

Figura 13 - Preparo da pasta de cimento em mesa de vidro para o capeamento



Fonte: Acervo do Autor

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 foram 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, destes, 7 blocos de cada traço passaram pelos ensaios de compressão simples e 3 pelos ensaios de absorção de água.

O capeamento ocorreu nas duas faces do bloco ficando no mínimo 24 horas em uma das faces para o seu endurecimento. Após esse tempo, a mesa em que ocorreu o processo foi limpa, e uma nova argamassa fluída foi 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 (14), mostra o tanque ainda seco com os blocos em formato de prisma dispostos.

Figura 14 - Corpos de prova no tanque aguardando imersão



Fonte: Acervo do Autor

A realização dos ensaios de resistência mecânica à compressão simples do corpo de prova foi obtida pela divisão da carga de ruptura pela sua área da seção transversal (Figura 16). A média aritmética dos valores individuais obtidos para cada corpo de prova foi determinada pela resistência média de cada composição, utilizou-se a máquina universal de ensaios 10.000, microprocessada, da marca EMIC, para carga máxima de 2000 kN. Os ensaios foram realizados em triplicata. Os blocos alvenaria solo-cimento com resíduos inorgânicos na composição têm as seguintes dimensões 27,0 de comprimento, 12,5 cm de largura e 9,0 cm de altura, Figura (15).

Figura 15 - Fotografia do bloco de alvenaria de solo-cimento com resíduos inorgânicos na sua composição sendo submetido ao ensaio de avaliação da sua resistência máxima de ruptura



Fonte: Acervo do autor

4.6.1 Avaliação da absorção de água nos blocos de alvenaria

Os tijolos, após 28 dias, passaram por uma avaliação de sua absorção de água, a fim de se verificar o atendimento às normas da ABNT NBR 8492. O ensaio de absorção de água foi conduzido levando os tijolos a estufa de marca Vulcan (EES-283D), Figura (16), a 105° durante 24 horas e posteriormente levados a balança (AD5000-R), tendo sido anotadas as suas massas. Depois eles foram levados ao tanque para imersão por 24 horas, retirados e secados o excesso de água. Após esse processo eles foram levados novamente a balança (AD500-R) e tiveram suas massas anotadas. Todos os resultados obtidos foram comparados com blocos produzidos sem a adição de resíduos.

Figura 16 – Estufa ECAMO



Fonte: Acervo do Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos serão discutidos tendo como interesse a estimativa de cenários em que a composição dos blocos formulados a partir dos traços desenvolvidos possam estar alinhados aos princípios norteadores do trabalho. Estes princípios podem ser agrupados em torno das dimensões social/ambiental, tecnológica e comercial. Assim, buscar os seguintes entendimentos: qual é o bloco mais sustentável? Como a substituição do solo por uma combinação de resíduos inorgânicos afeta a suas propriedades? Qual seria o(s) produto(s) competitivo(s) dentre o(s) desenvolvidos? Esses questionamentos, considerados em relação ao estudo realizado, podem ser apreciados nas análises que seguem.

5.1 A Transformação de Resíduos em Matéria Prima e suas Características

Atualmente os materiais adotados na pesquisa como resíduos, essencialmente inorgânicos, constituem-se de passivos ambientais. A implicação desse problema é enorme e cumulativa. Estes materiais têm um processo de degradação muito lenta e a disposição destes materiais em aterros sanitários é uma das alternativas empregadas na solução do problema. No entanto, essa estratégia é cara e sem futuro devido a diminuição dos espaços urbanos dedicados a esse fim (LEITE *et al.*, 2011; AMORIM, 2013).

Os resultados deste trabalho apresentaram propostas comparativas para aliviar parte deste problema, através da transformação do lodo de ETA coletado no período chuvoso, agora denominado “lodo chuvoso” e o lodo de ETA coletado no período de estiagem, “lodo estiagem” em matéria-prima, com características adequadas à geração de novos produtos mais sustentáveis para a CC. Assim, a meta deste estudo foi processar esses materiais empregando-os na fabricação de blocos de solo-cimento de forma que puderam conduzir a um bloco de alvenaria de solo-cimento com resistência adequada a sua utilização em alvenaria de vedação.

O centro desta meta foi um bloco de solo-cimento com substituição de solo por resíduos com resistência de $2,2 \pm 0,2$ MPa e com a maior substituição de resíduo e menor quantidade de cimento. O processamento por trituração do lodo foi capaz de diminuir o tamanho das partículas, possibilitando a formação de pó, Tabela (6). Esses pós apresentaram partículas com mesmo diâmetro máximo de 2,36mm. No entanto, apresentaram valores de módulo de finura diferentes. O pó de lodo de ETA coletado no período chuvoso com 2,26 e o pó de lodo de ETA

coletado no período de estiagem com 2,06, caracterizando-os como material fino em uma zona ótima conforme NBR 7211 - Módulos de finura, Tabela (7).

Tabela 6 - ABNT NBR 7211 – Módulos de Finura

Caracterização	Módulo de Finura	Zona	Módulo de finura
Muito grossas	> 3,9	Utilizável inferior	1,55 < MF < 2,2
Grossas	3,3 < MF > 3,9	Ótima	2,2 < MF < 2,9
Médias	2,4 < MF < 3,3	Utilizável superior	2,9 < MF < 3,5
Finas	< 2,4		

Fonte: NBR 7211

Tabela 7 - Composição Granulometria dos Lodos de ETA de cada período da coleta – NBR NM-ISSO 3310-1

Composição Granulometria do lodo estiagem - NBR NM-ISSO 3310-1				
Peneiras (µm)	Lodo Estiagem (g)	Porcentagem (%)	% Acumulada	% Passante
4750	0	0,00	0,00	100,00
2360	0,3	0,15	0,15	99,85
1180	35,7	17,95	18,10	81,90
600	50,9	25,59	43,69	56,31
300	42,3	21,27	64,96	35,04
150	28,6	14,38	79,34	20,66
<150	41,1	20,66	100,00	0,00
∑	198,9	100	206,23	
Perda	1,1	0,55%		
Modulo de Finura	2,06	Diâmetro Máximo	2,36 mm	
Composição Granulometria do lodo chuvoso - NBR NM-ISSO 3310-1				
Peneiras (µm)	Lodo Chuvoso (g)	Porcentagem (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
4750	1,7	0,85	0,85	99,15
2360	4,6	2,31	3,17	96,83
1180	27,8	13,98	17,14	82,86
600	56,2	28,26	45,40	54,60
300	47,3	23,78	69,18	30,82
150	41	20,61	89,79	10,21
<150	20,1	10,11	99,90	0,10
∑	198,7	100	225,54	
Perda	1,3	0,65%		
Modulo de Finura	2,26	Diâmetro Máximo	2,36 mm	

Fonte: Acervo do autor

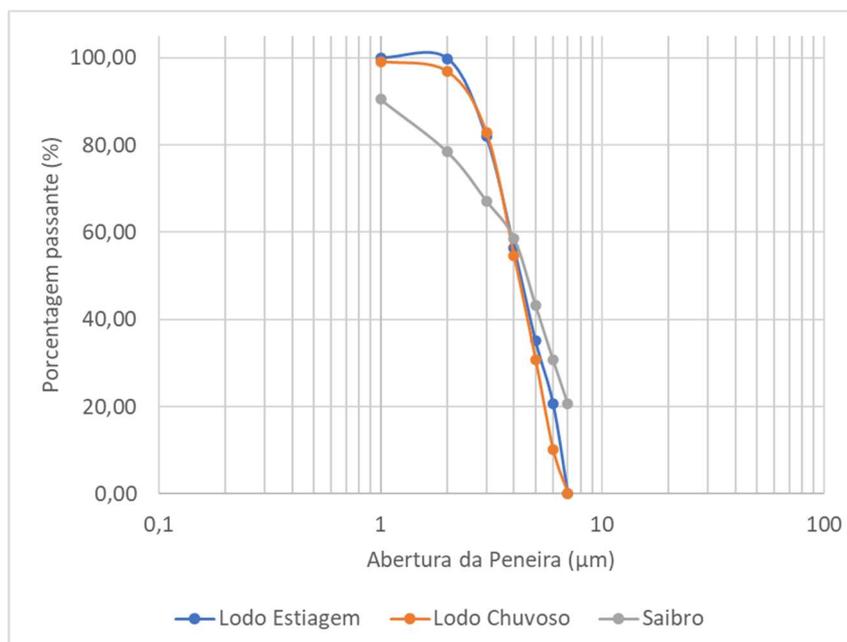
As porcentagens de material retido no conjunto de peneiras mostram que o tamanho das partículas é menor que 2360 μm . Além disso, também pode ser observado em função dos resultados experimentais que o processamento dos materiais levou a um menor tamanho das partículas processadas de lodo estiagem em relação ao lodo chuvoso. Essa diferença no tamanho das partículas é mais acentuada entre partículas com o tamanho médio de 600 μm , Tabela (8).

Tabela 8 – Diferença em percentual de material passante entre lodo do período chuvoso e lodo do período de estiagem.

Peneiras (μm)	Lodo Chuvoso	Lodo Estiagem	Percentual Comparativo (%)
	% Acumulada	Acumulada (%)	
4750	0,86	0,0	0,0
2360	3,17	0,15	4,76
1180	17,16	18,10	94,82
600	45,45	43,69	96,14
300	69,25	64,96	93,80
150	89,88	79,34	88,27
< 150	100	100	100
Peneiras (μm)	Lodo Chuvoso	Lodo Estiagem	Percentual Comparativo (%)
	% Passante	Passante (%)	
4750	99,14	100,00	99,14
2360	96,83	99,85	96,98
1180	82,84	81,90	98,87
600	54,55	56,31	96,88
300	30,75	35,04	87,75
150	10,12	20,66	48,95
< 150	0	0	0

Fonte: Acervo do autor

Estes resultados reforçam a convergência dos dois processos na diminuição das partículas. Isto pode ser observado através da distribuição granulométrica, no perfil semelhante das curvas granulométricas, Gráfico (1).

Gráfico 1- Distribuição granulométrica dos lodos e saibro.

Fonte: Acervo do autor

A natureza distinta dos materiais, oriunda do estabelecimento de ligações químicas intermoleculares, agem no estado de agregação das moléculas e o seu ordenamento de longo alcance (cristalinidade), que se manifestam presente no lodo de ETA onde tem a sua estrutura física é mediada pela presença de água na sua estrutura (SUKSIRIPATTANAPONG, 2015).

Tabela 9 – Resultado laudo analítico Laboratório de Recursos Hídricos.

Item	Parâmetro	Lodo Estiagem	Lodo Chuvoso	Unidade	VMP	Método	LDM
1,00	Sólidos Totais	72,82	67,51	% p/p	NC	SM 2540	1,00
2,00	Cinzas	53,27	53,97	% p/p	NC	SM 2540	1,00
3,00	Umidade	27,18	32,49	% p/p	NC	SM 2540	1,00
4,00	Voláteis	46,73	46,03	% p/p	NC	SM 2540	1,00

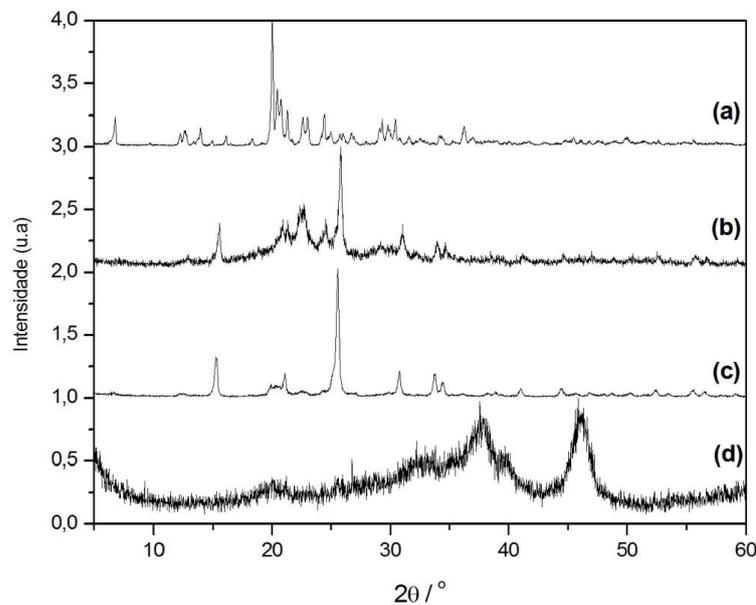
Fonte: Acervo do autor

A Tabela (9) demonstra os resultados do laudo analítico emitido pelo Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP onde é possível observar que molécula de água se encontra nesta estrutura de duas formas distintas. No primeiro caso, Lodo Estiagem, com menor energia associada, ela exerce uma função de hidratação permitindo que ligações de hidrogênio sejam estabelecidas. No segundo caso, Lodo Chuvoso, a água encontra-se associada a estruturação do cristal tendo, portanto, uma maior energia associada. Assim, o

processo de secagem pode remover a água associada a hidratação, contudo a remoção de água associada a cristalização requer valores mais altos de energia para o rompimento intermolecular.

Dessa forma, tendo uma estrutura cristalina evidenciada pela análise de Raio-X, Gráfico (2), o lodo apresenta-se como um material cristalino, tendendo a ter ruptura semelhante à de materiais frágeis. Ou seja, fragmenta-se facilmente sob impacto quando estão assistidos por água. Esse fato pode levar a compressão do menor tamanho das partículas de lodo de ETA (GONTIJO NETO, T.M. *et al.*, 2018).

Gráfico 2 - (a) Lodo desidratado em condições ambientais normais; **(b)** Lodo de ETA calcinado a 300 °C; **(c)** Lodo de ETA calcinado a 600 °C; **(d)** Lodo de ETA calcinado a 900 °C.



Fonte: GONTIJO NETO, T.M. *et al.*, 2018.

A capacidade desses materiais em se reorganizarem, interagirem e se associarem depende da forma como interagem com a água. E essa interação depende da formação e da extensão das ligações de hidrogênio estabelecidas através das partículas. Nessa perspectiva, o lodo chuvoso ao interagir com água tem menor alteração de sua consistência, tampouco a sua plasticidade, por já haver uma maior hidratação mediante as condições necessárias para o tratamento de água daquele período, já que as partículas de lodo estiagem, interagem com água facilmente. Todavia, ocasionando sempre variações dimensionais significativas, responsáveis pela alteração da forma, principalmente se houver sido moldada. Assim, esses materiais, individualmente, não podem conferir capacidade de moldagem ao bloco de solo-cimento.

Dessa forma, tratando-se de bloco de solo-cimento, o solo é um elemento importante nesse contexto e a ampla diversidade de tipos afetam de maneira inequívoca as suas propriedades (ALMEIDA *et al.*, 2017; TAFAREL, 2016). A capacidade plástica ao serem analisada mostram que o solo não consegue atingir o limite plástico e, por isso, é caracterizado predominantemente como arenoso, Figura (17). Com isso, sempre estará no estado de consistência semissólido ou sólido, independente do teor de umidade presente, apresentando-se incoesivo.

Figura 17 - Moldagem das massas umedecidas em formato elipsoidal



Fonte: Acervo do autor

Esses aspectos relacionados a falta de coesão das partículas de materiais não estão relacionados com o seu tamanho, mas com a sua natureza química e física. Desta maneira, a fabricação de blocos de solo-cimento, que se dá por moldagem, é fortemente dependente de um material que possa realizar a aglomeração entre as partículas. Esse material é o cimento, aglomerante hidráulico, que além de proporcionar o efeito aglutinador também confere resistência mecânica, através da realização de ligações químicas durante o seu processo de cura. Assim, através de formulações empregando uma mistura de partículas de lodo de ETA do período de estiagem ou do período chuvoso, solo arenoso e cimento estudou-se a resistência mecânica em ensaios uniaxiais e a absorção de água destes blocos.

De uma maneira geral, os trabalhos envolvendo essa abordagem (correlação entre composição e propriedades) não são novidades na literatura e o número de trabalhos

envolvendo a reutilização e reciclagem de materiais visando o emprego na CC vem aumentando. Contudo, existe uma certa dificuldade na avaliação dos resultados dos trabalhos publicados. Isso em decorrência dos valores empregados na substituição/adição dos resíduos na formação dos blocos. Esse problema acontece em grande parte em função da adoção de sistemas de medidas distintos: massa e volume. Todavia, esse problema pode ser normalizado através do emprego da massa específica dos materiais.

5.2 A Fabricação dos Blocos de Alvenaria de Solo-Cimento e as Implicações da Substituição do Solo por Resíduos

A fabricação dos blocos ocorreu em dois ensaios distintos, em função da sua coleta. No primeiro momento avaliou-se as propriedades dos blocos coletados na ETA no período chuvoso, compreendidos nos meses de novembro até fevereiro. No segundo ensaio ficando em função das coletas entre os meses de abril e outubro, período de escassez hídrica.

Os maiores valores de resistência foram obtidos a partir da introdução do lodo chuvoso. A diferença entre esses valores está relacionada a composição química existente entre os dois tipos de material (PEREIRA, 2016). Ainda pode-se perceber que o aumento do teor de lodo de ETA do período de estiagem afeta a resistência dos blocos de alvenaria diminuindo a sua resistência mecânica. Contudo, a diminuição de resistência, considerando os dados apresentados e de acordo com a NBR 8492, inviabilizam a sua utilização em valores percentuais acima de 10%. Pois a resistência mecânica do bloco é menor do que o valor mínimo permitido é de 2 MPa. Assim, os valores de resistência dos blocos fabricados com resíduos apresentam uma grande variação na resistência mecânica, que dependem do teor de resíduo introduzido e do seu tipo (natureza), quando comparado a um bloco controle (que é o bloco produzido apenas com a mistura de solo e cimento).

Os valores de absorção de água combinados com os valores de resistência mecânica permitem avaliar as propriedades dos blocos apenas no momento do seu ensaio, realizado em um tempo curto em relação a sua vida útil ou aplicação. A absorção de água não importando o período de coleta estão notadamente altos, no limite. Esse fato, em caso de utilização do produto, principalmente tendo o lodo de ETA na sua composição, pode proporcionar efeitos que inviabilizem a sua utilização. Assim, ao realizar o estudo da evolução da resistência mecânica e da absorção de água em blocos em tempos longos após a sua cura, pôde-se estimar que o efeito de absorção de água e resistência mecânica são afetados e ambos diminuem.

5.2.1 Fabricação de blocos de alvenaria através da substituição de solo por combinações de resíduos: Planejamento Fatorial

De acordo com os estudos realizados anteriormente, foi possível estabelecer os limites de substituição individual de cada resíduo em um bloco de solo-cimento. Nos estudos a seguir, foram empregadas combinações de resíduos em um planejamento fatorial completo (DCCR), com duas variáveis independentes. A Tabela (10), mostra os traços usados para análise do DCCR, onde foi necessária uma amostra com 11 traços e medidos sua resistência mecânica aos 28 dias junto a absorção de água. Nesse estudo avaliou-se a relação da resistência mecânica e absorção de água, como sendo respostas aos traços formulados e estudados. Na tabela podem ser visualizados os valores percentuais praticados, que estão associados com a tabela de valores codificados empregados no modelo estatístico escolhido. Ainda, observa-se os valores da resistência mecânica em MPa (Y_1) e absorção de água em porcentagem (Y_2) associado a cada traço.

Tabela 10 - Análise delineamento fatorial - DCCR

Traços	Lodo estiagem				Lodo chuvoso				Cimento	
	(x_1)	(%)	Yi1 %	Yi2 (MPa)	(x_1)	(%)	Yi1 %	Yi2 (MPa)	(x_2)	(%)
1	-1	1,96	14%	1,01	-1	1,96	9%	1,57	-1	7,84
2	1	7,41	15%	0,73	1	7,41	12%	1,18	-1	7,41
3	-1	1,96	15%	2,02	-1	1,96	11%	1,49	1	14,85
4	1	7,41	16%	1,57	1	7,41	12%	1,50	1	14,02
5	-1,41	0,00	14%	1,65	-1,41	0,00	7%	2,12	0	11,71
6	1,41	9,09	15%	1,31	1,41	9,09	8%	0,59	0	10,65
7	0	4,89	14%	1,30	0	4,89	14%	0,64	-1,41	5,43
8	0	4,89	15%	1,30	0	4,89	12%	0,95	1,41	16,58
9	0	4,89	15%	1,84	0	4,89	16%	0,82	0	11,14
10	0	4,89	15%	1,84	0	4,89	16%	0,82	0	11,14
11	0	4,89	15%	1,84	0	4,89	16%	0,82	0	11,14

Fonte: Acervo do autor

A análise de variância nos permite comparar vários grupos ao mesmo tempo, utilizando variáveis contínuas. O método para tal análise inicia considerando que as amostras possuem médias iguais. Posteriormente, é realizado o teste de hipóteses através da estatística F de Snedecor e, assim, verificar se a hipótese de que as médias são iguais pode ser aceita. A rejeição ocorre caso o F calculado seja maior que o F tabelado, Tabela (11).

Tabela 11 - Análise de variância com lodo coletado no período de estiagem.

LOCO ESTIAGEM					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	0,00050431	5	0,00010086	8,8511	0,0159
Resíduos	0,00005698	5	0,00001140		
Total	0,00056129	10			
LODO CHUVOSO					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	0,009440098	5	0,0018880	32,099	0,0008
Resíduos	0,000294091	5	0,0000588		
Total	0,009734189	10			

Fonte: Acervo do autor

No estudo realizado tem-se $F_{calc} > F_{tab}$, com isso, a hipótese é rejeitada. Conclui-se que existe pelo menos uma média que difere da outra significativamente. Além disso, podemos confirmar a rejeição da hipótese utilizando o p-valor, também apresentado na Tabela (12). Se o p-valor for maior que o nível de significância (α), a hipótese de igualdade foi rejeitada. Como no estudo α é 5%, tem-se $p\text{-valor} < \alpha$, confirmando a análise anterior. O valor de R² foi de 89,85% para o lodo de ETA coletado no período de estiagem e 96,98% para o lodo de ETA coletado no período chuvoso, esse valor considerando-se a utilização de resíduos para a formulação apresenta-se coerente com a literatura.

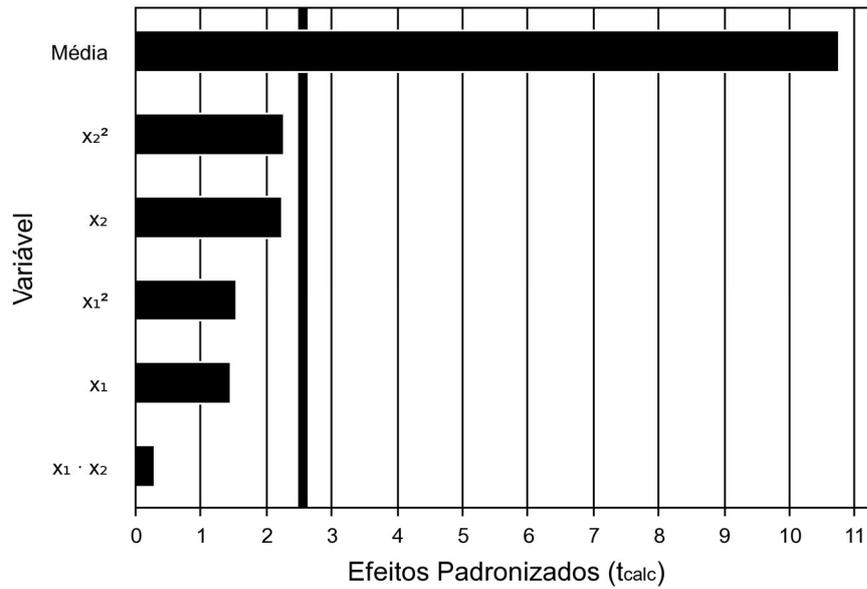
Tabela 12 - Análise da regressão dos resultados experimentais obtidos pelo modelo fatorial empregado na produção dos traços dos blocos de alvenaria de solo-cimento com resíduos na sua composição.

LODO ESTIAGEM				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	0,1486	0,00195	76,24521	0
X ₁	0,00583	0,00119	4,88168	0,00455
X ₁ ²	-0,00091	0,00142	-0,63796	0,55157
X ₂	0,00505	0,00119	4,23172	0,00823
X ₂ ²	-0,00076	0,00142	-0,53237	0,61727
X ₁ · X ₂	-0,00238	0,00169	-1,40711	0,21841
LODO CHUVOSO				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	0,1552	0,00443	35,05066	0
X ₁	0,00826	0,00271	3,04753	0,0285
X ₁ ²	-0,03935	0,00323	-12,1927	0,00007
X ₂	-0,00101	0,00271	-0,3717	0,72535
X ₂ ²	-0,01113	0,00323	-3,44711	0,01829
X ₁ · X ₂	-0,00592	0,00383	-1,54512	0,18298

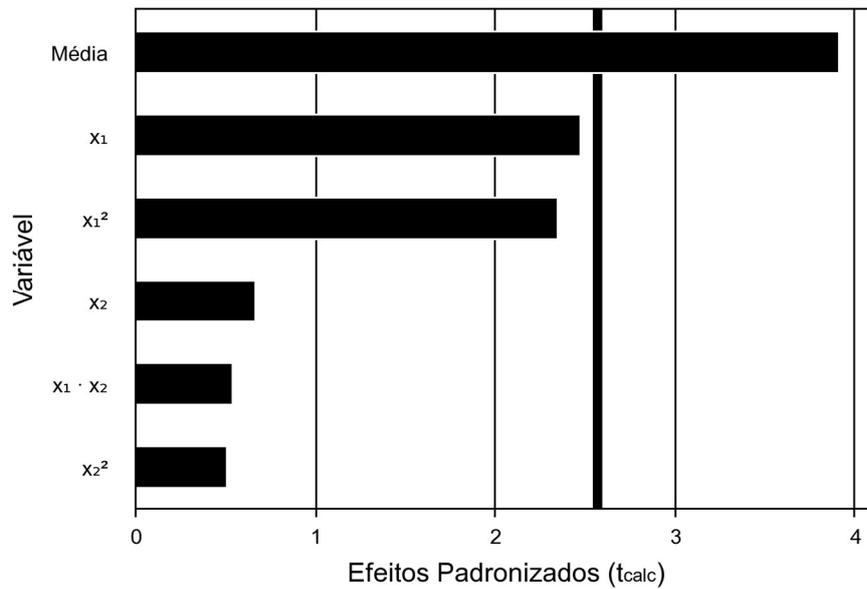
Fonte: acervo do autor

Mesmo com discrepância entre valores preditos e observados é possível obter R^2 igual a 89%, que aparentemente não é muito alto para essa análise. Contudo, “proporção da variação explicada”, R^2 pode originar equívocos prejudicando a análise dos resultados, o que não é o caso. Pois quando mal interpretadas podem ser confundidas, já que são usadas em decisões de um bom modelo de regressão não-linear (RATKOWSKY, 1990).

É necessário ter cuidado ao interpretar R^2 em uma estatística descritiva. 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). Observa-se que todos os itens acima de 0,05, na Tabela (12), são variáveis que não causam efeito a um nível de confiança de 95% estabelecida na análise de Pareto, que também estabelece a força relativa das interações considerando o seu nível de confiança a 95%. Como mostra o Gráfico (3) de Pareto, lodo estiagem, 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 e o Gráfico (4) de Pareto, lodo chuvoso.

Gráfico 3 - Gráfico de Pareto – Lodo Estiagem

Fonte: Acervo do autor

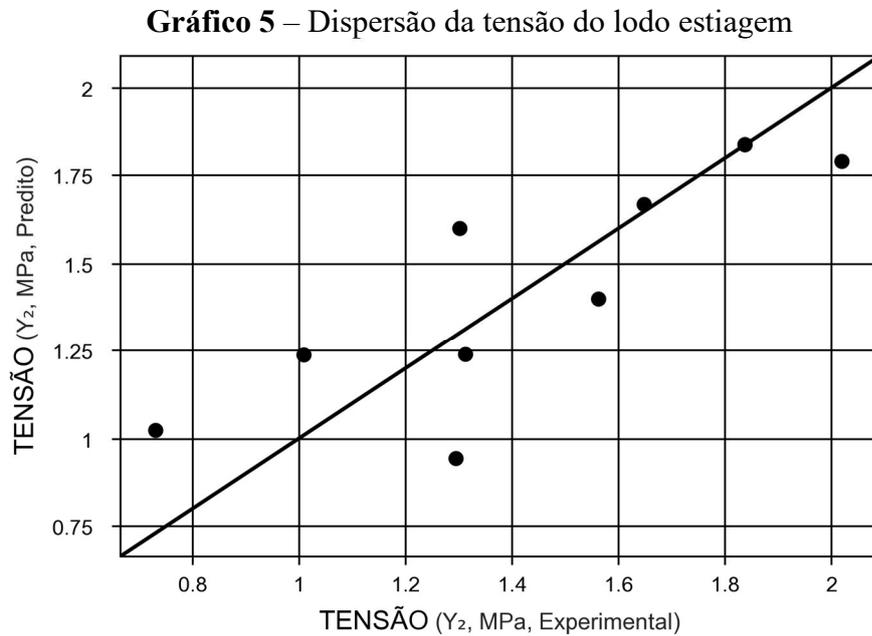
Gráfico 4 - Gráfico de Pareto – Lodo Chuvoso

Fonte: Acervo do autor

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 a 95% de confiança. Da mesma forma com as interações do lodo (x_1) com o lodo (x_1), do cimento (x_2) com o cimento (x_2), do lodo (x_1) com cimento (x_2) podem ser descartadas para a reformulação do modelo paramétrico, permitido pelo uso do modelo.

Observa-se que a relação de lodo com cimento para com resistência mecânica é praticamente nula, que é algo que condiz com a literatura, já que o teor de lodo no material influencia na perda de resistência mecânica, pois, o mesmo se transforma em etringita², um material expansivo. Concluindo então que o principal motivo para ganho de resistência é o teor de cimento (BARRETO, 2020).

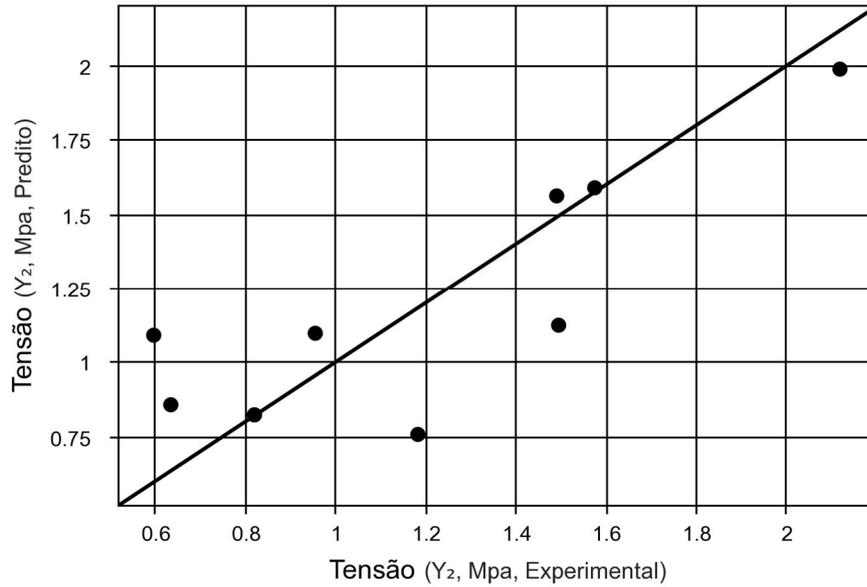
Dentro de uma faixa de tensão 1,0 – 1,5 MPa, observa-se que dispersão e baixa, Gráfico (5), lodo estiagem, Gráfico (6), lodo chuvoso, a relação entre a tenção experimental e predita. Se os valores experimentais e preditos coincidem, significa que temos um modelo de regressão fidedigno aos resultados experimentais.



Fonte: acervo do autor

² É um composto químico mineral de sulfato de cálcio e alumínio hidratado, de incolor a amarelo que cristaliza no sistema trigonal.

Gráfico 6 – Dispersão da tensão do lodo chuvoso



Fonte: acervo do autor

Percebe-se também que os valores experimentais estão subestimados, o que pode estar relacionado ainda em um melhor processamento podendo ser realizado para chegar aos valores parametrizados. Segundo Tutikian e Helene (2011) a desvantagem de não apresentar métodos para estabelecimentos dos traços, e que, podem proporcionar dispersões nos resultados em função do tipo de material empregado no estudo.

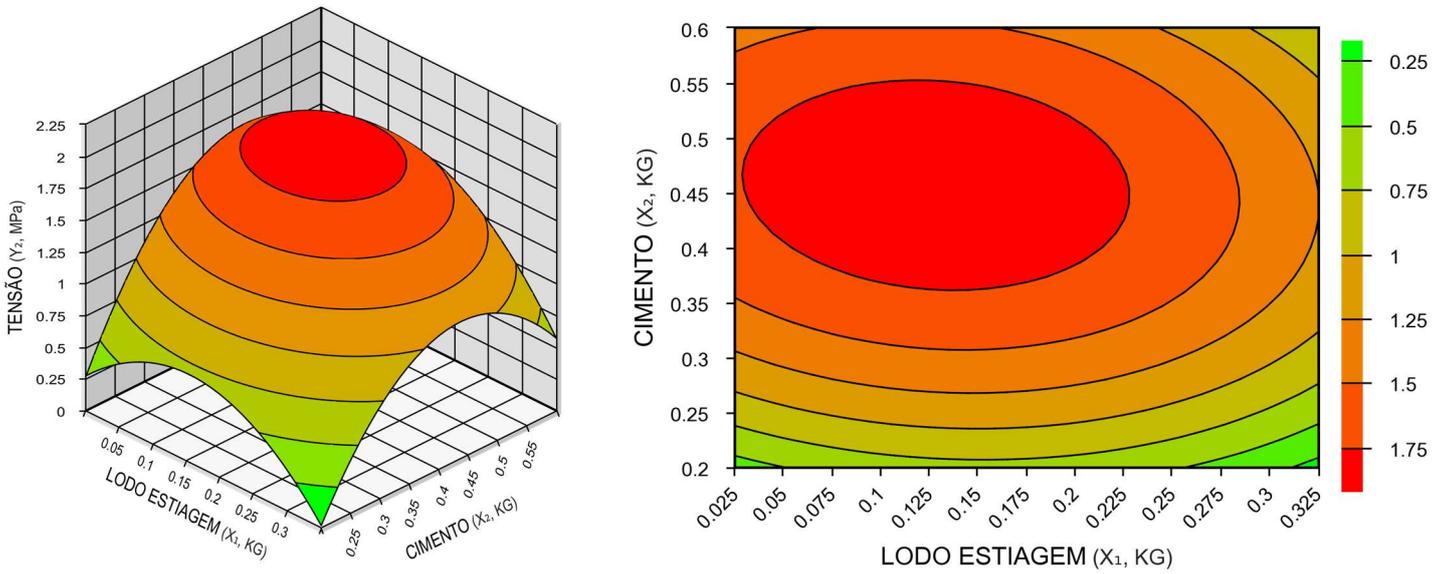
De acordo com os resultados obtidos, empregando o modelo estatístico, foi possível gerar as superfícies de resposta dos efeitos, em relação a variação dos teores de resíduos utilizados na substituição do solo dos blocos para com sua resistência mecânica. sendo possível a análise por uma variação controlada, de acordo com o modelo gerado pelo aplicativo da *Protimiza Experimental Designed*.

Ao utilizar o modelo para se encontrar as relações das variáveis foi obtida uma superfície de resposta a partir da análise das composições de lodo e cimento em relação a sua resistência mecânica. Foram gerados dois modelos, “**MODELO 01 - LODO ESTIAGEM**” que representa o delineamento tendo como variável a proporção de lodo de ETA do período de estiagem e o “**MODELO 02 - LODO CHUVOSO**” com incorporação de lodo do período chuvoso.

MODELO 01 - LODO ESTIAGEM: $Y_{i2} = 1,84 - 0,15 x_1 - 0,19 x_1^2 + 0,23 x_2 - 0,28 x_2^2 - 0,04 x_1 x_2$

MODELO 02 - LODO CHUVOSO: $Y_{i2} = 0,82 - 0,32 x_1 + 0,36 x_1^2 + 0,08 x_2 + 0,08 x_2^2 + 0,10 x_1 x_2$

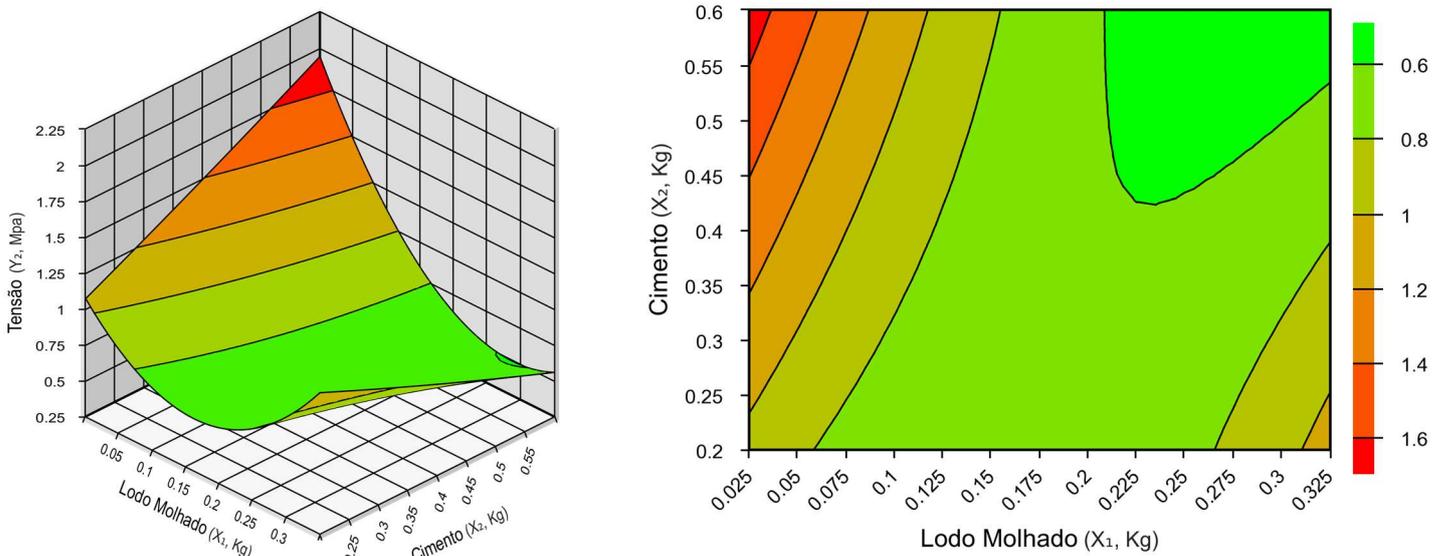
Gráfico 7 - Superfície de resposta da resistência mecânica obtidas para lodo de estiagem



Fonte: Acervo do autor

O Gráfico (7), foi gerado a partir da modelagem do “**MODELO 01 - LODO ESTIAGEM**” gerando uma superfície de resposta onde é possível observar a interação da proporção de lodo de ETA (%) retirados no período de seca e a do cimento (%), tendo como resposta que o aumento de da proporção de cimento é fundamental para ganho de resistência, já tendo um comportamento inverso em relação a proporção de lodo de ETA.

Gráfico 8 - Superfície de resposta da resistência mecânica obtidas para lodo chuvoso



Fonte: Acervo do autor

O Gráfico (8), foi gerado a partir da modelagem do “**MODELO 02 - LODO CHUVOSO**” gerando uma superfície de resposta onde é possível observar a interação da proporção de lodo de ETA (%) retirados no período de chuva e a do cimento (%), tendo como resposta que o aumento de da proporção de cimento é fundamental para ganho de resistência, já o lodo demonstrando uma perda enorme de resistência com qualquer percentual incorporado, quando comparado com o “**MODELO 01 - LODO ESTIAGEM**”.

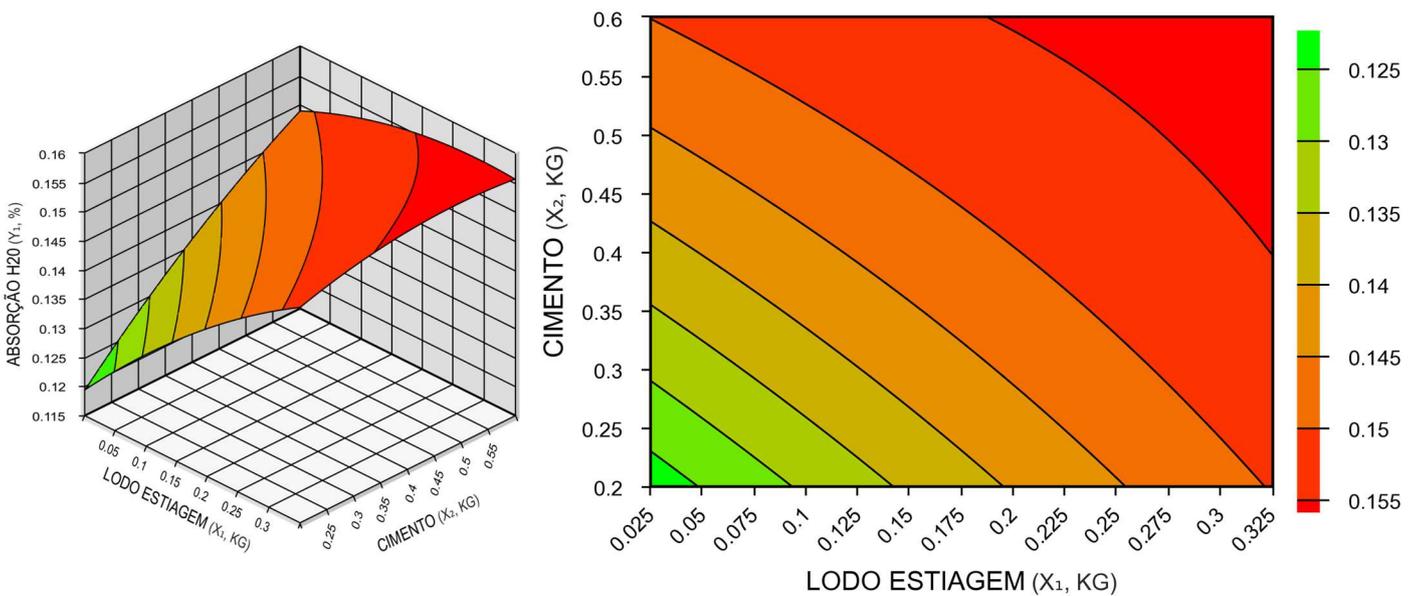
A mesma análise, também feita para absorção de água, somada a relação entre as variáveis diferentes, o Modelo 03 e 04, é utilizado para obter uma superfície de resposta para observar a correlação das variáveis para sua absorção mecânica, Gráfico (9), lodo de estiagem e Gráfico (10), lodo chuvoso. Conclui-se absorção de água é aumentada de acordo com acréscimo do teor de lodo. Sendo a situação ótima da absorção de água menor que 20%, encontrada quando a uma aproximação do teor de cimento com o teor de lodo.

MODELO 03 - LODO ESTIAGEM: $Y_{i1} = 0,15 + 0,01 x_1 + 0 x_1^2 + 0,01 x_2 + 0 x_2^2 + 0 x_1 x_2$

MODELO 04 - LODO CHUVOSO: $Y_{i1} = 0,16 + 0,01 x_1 - 0,04 x_1^2 + 0 x_2 - 0,01 x_2^2 - 0,01 x_1 x_2$

X₂

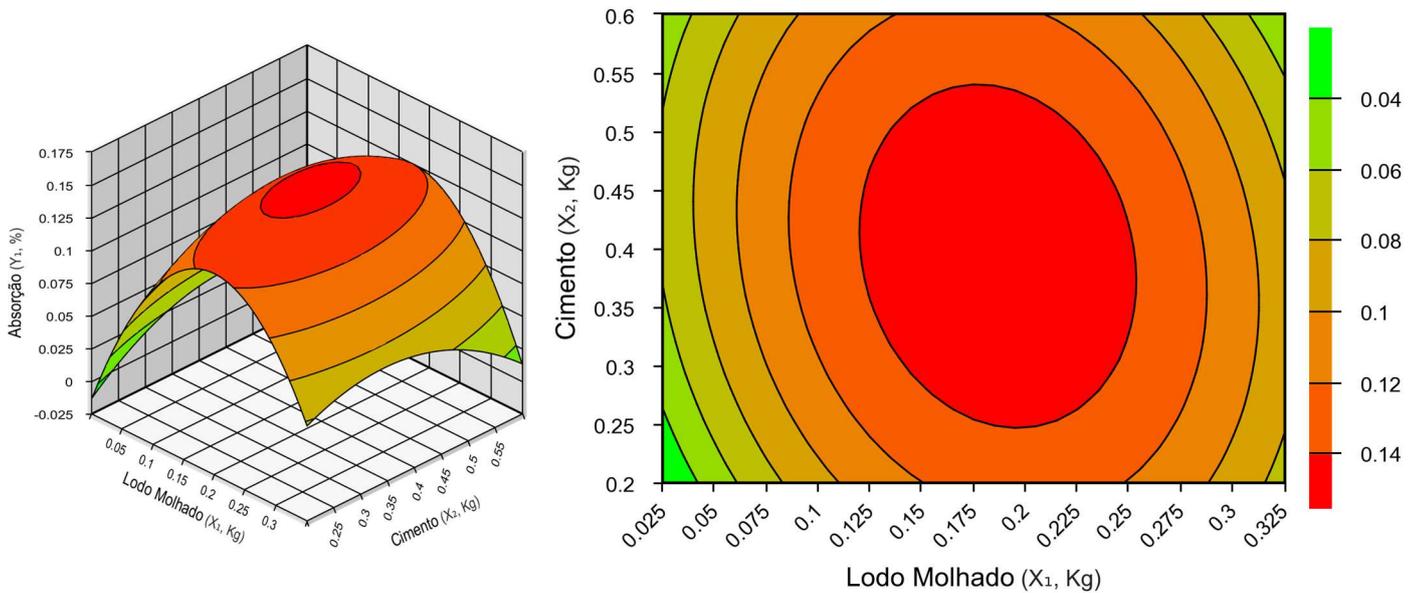
Gráfico 9 - Superfície de resposta da absorção de água para o lodo de estiagem



Fonte: Acervo do autor

O Gráfico (9), foi gerado a partir da modelagem do “**MODELO 03 - LODO ESTIAGEM**” gerando uma superfície de resposta da interação da proporção de lodo de ETA (%) retirados no período de seca e a do cimento (%), tendo como resposta que as duas variáveis contribuem para o aumento da absorção de água (%).

Gráfico 10 - Superfície de resposta da absorção de água para o lodo chuvoso



Fonte: Acervo do autor

O Gráfico (10), foi gerado a partir da modelagem do “**MODELO 04 - LODO CHUVOSO**” e como resposta apresenta uma curva demonstrando que as interações nos pontos centrais são as maiores contribuintes para o aumento da absorção de água (%), o que condiz com o período de retirada da amostra, demonstra que o lodo tem uma capacidade de absorção tanto quanto elevada, tendo um material mais húmido em relação ao modelo 03.

Observando os efeitos parametrizados das relações das variáveis analisa 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, tem-se que as principais variáveis que influenciam para o aumento da absorção são provocadas pelo lodo e o cimento, com suas variações.

A partir disso, 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 quando analisado com a incorporação de lodo de ETA do período de estiagem divergindo do período chuvoso. Da

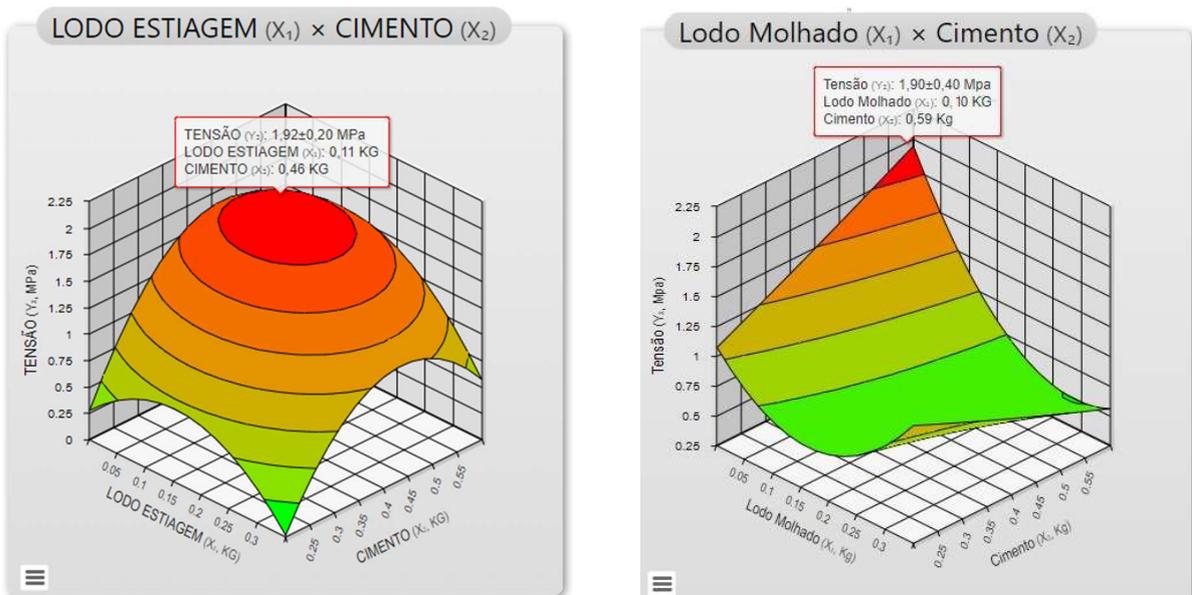
mesma forma, com as interações do cimento (x_2) com lodo (x_1) podem ser descartadas para a reformulação do modelo paramétrico. E isto está relacionado com os mecanismos de formação da etringita, como foi mencionado anteriormente.

5.3 A Situação dos Blocos: Quais os Candidatos a Produto

Ainda com DCCR, foi possível observar as interações dos resíduos com a resistência mecânica, Gráfico (11 e 12), tendo como objetivo obter um bloco de solo-cimento com resíduos inorgânicos em sua composição de $2,2 \text{ MPa} \pm 0,2$. Observa-se que a influência do lodo na resistência mecânica é um fator predominante, onde o maior teor de lodo obtém-se uma menor resistência mecânica.

Ao analisar os gráficos, observa-se as influências das variáveis na evolução da resistência mecânica e absorção de água. Assim é possível estabelecer alguns cenários onde os teores de resíduos e o compromisso com as propriedades estudadas estão em acordo com os objetivos desse trabalho.

Gráfico 11 - Superfície de resposta da resistência mecânica com o ponto máximo de acordo com a modelam.



Fonte: Acervo do autor

No Gráfico (11), é estabelecido o traço de ponto máximo de acordo com a modelagem, que se constitui o cenário ideal para um traço adequado a formulação de um produto. A partir

desses cenários é possível chegar à Tabela (13), onde estão expressos os valores de composição e resistência de blocos que atenderiam ao estabelecido no objetivo do trabalho. Apresentando um leque de opções enorme para a incorporações de resíduos em blocos de solo-cimento, tendo como seu forte a possibilidade de contribuir a para diminuição de grandes problemas ambientais relacionados aos descartes de resíduos sólidos inorgânicos. Estes blocos estão expressos na tabela em função da sua adesão a proposta do trabalho.

Tabela 13 - Seleção de traço adequados a fabricação de blocos de solo-cimento com a substituição de solo por resíduos inorgânicos.

Traços	Lodo de ETA		Cimento		Solo		RESISTENCIA	ABSORÇÃO
	(kg)	%	(kg)	%	(kg)	%	(kg)	(%)
Lodo Estiagem	0,11	3,24	0,46	13,14	2,93	83,71	1,92 ± 0,20	15,32 ± 1,03
Lodo Chuvoso	0,1	2,94	0,59	16,86	2,81	80,29	1,90 ± 0,40	14,96 ± 1,01

Fonte: Acervo do autor

Assim, pode-se analisar que o teor de resíduo incorporado ficou em um média de 3% que contém o maior percentual de substituição de resíduos por solo aliado com o menor emprego de cimento. Desta forma pode eleger esse bloco com uma alternativa viável de produto. Espera-se que este bloco, possa se configurar como uma alternativa ou que apresente contribuições significativas ao desenvolvimento de novos produtos, com características mais sustentáveis para a CC. Para verificar essa hipótese os materiais necessários para a fabricação de 12 blocos foram separados, Tabela (14), e toda a metodologia desse trabalho foi refeita, a fim de concretizar os dados estabelecidos.

Tabela 14 - Seleção de traço adequados a fabricação de blocos de solo-cimento com a substituição de solo por resíduos inorgânicos.

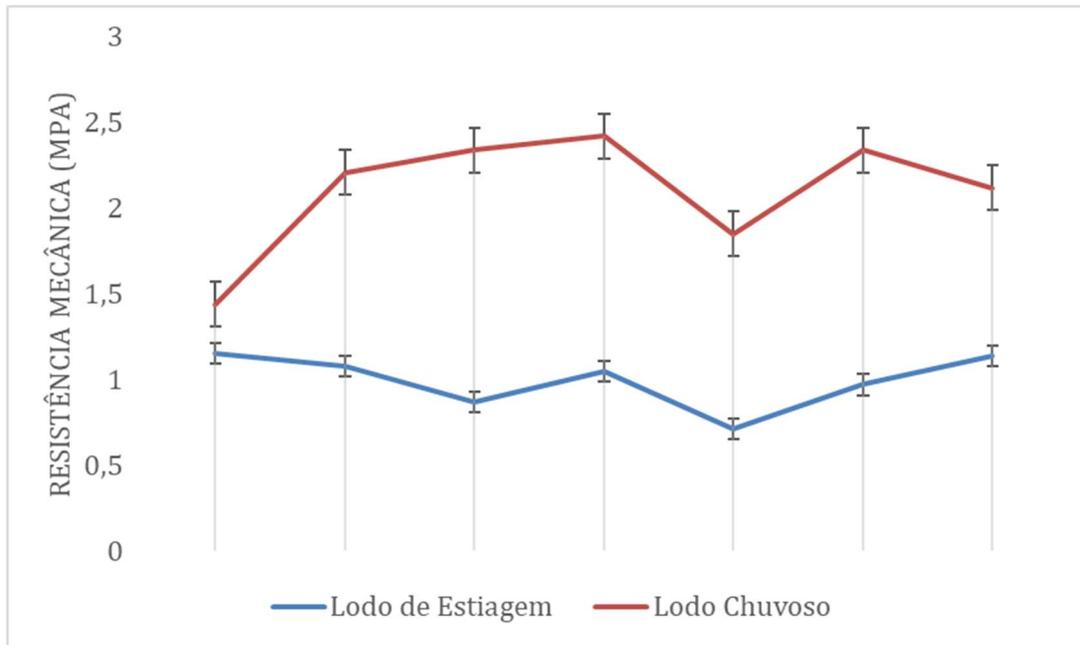
Traços	Lodo de ETA		Cimento		Solo		Umidade	Nº Blocos	Nº Blocos
	(kg)	%	(kg)	%	(kg)	%	(%)	Previstos	Feitos
Lodo Estiagem	1,32	3,24	5,52	13,14	35,16	83,71	10	12	11
Lodo Chuvoso	1,2	2,94	7,08	16,86	33,72	80,29	10	12	11

Fonte: Acervo do autor

Após todo processo refeito e passado os 28 dias de cura necessário para realizar os ensaios de resistência mecânica os blocos foram preparados de acordo com a metodologia vigente. Os blocos com incorporação de lodo de ETA coletados no período chuvoso apresentaram resistência mecânica favorável ao desenvolvimento dessa pesquisa, tendo como

resultado $2,10 \pm 0,26$ Mpa, já os blocos com de lodo coletados no período de estiagem apresentaram resistência $1,04 \pm 0,08$ Mpa bem abaixo do esperado pela modelagem, os erros amostrais calculados foram baixos conforme pode-se ser observado no Gráfico (12).

Gráfico 12 – Gráfico comparativo da resistência mecânica entre os traços ideais de acordo com a modelagem.

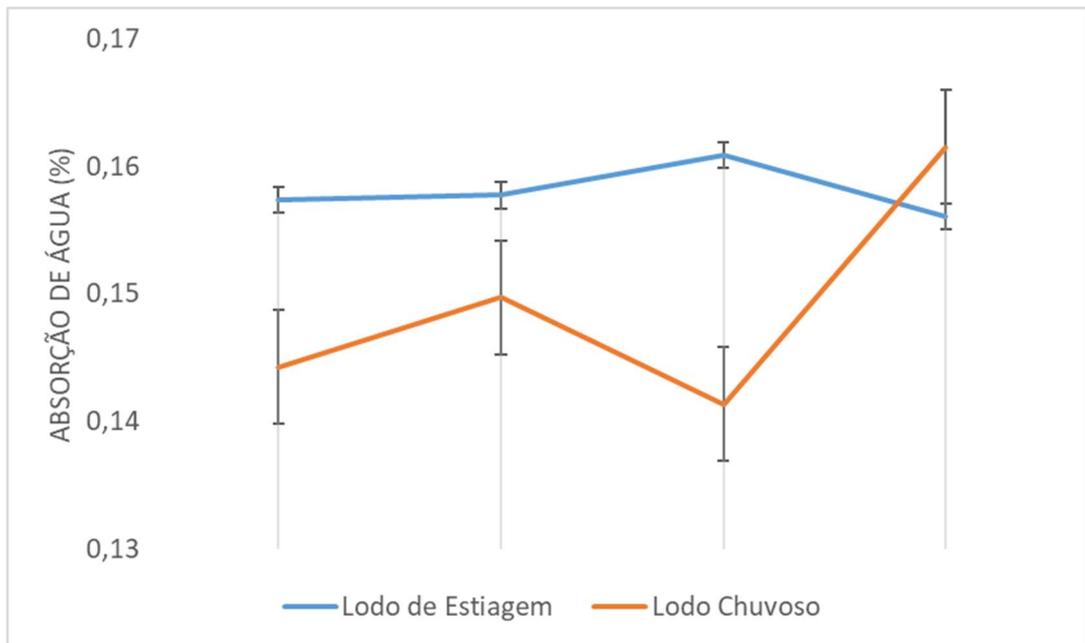


Fonte: Acervo do autor

O desempenho dos blocos em relação a absorção, Gráfico (13), são abaixo do máximo permitido na norma NBR 8492 que fixa 20% como máxima, porém os dois tipos de lodo apresentam em média absorções semelhantes por volta de 15%. Esses resultados demonstram que o lodo apresenta uma reta crescente mostrando que quanto maior teor de resíduo, maior sua absorção.

O solo seria o aglomerante que se relaciona diretamente com esses dados, evidenciando que o resíduo não fica inerte e, também, influenciando na maioria dos teores. É possível identificar, com o desvio padrão, que existe a interação entre os resíduos, já que mesmo aumentando os seus teores, o material ainda continua semelhante aos demais blocos.

Gráfico 13 – Gráfico comparativo da absorção de água os traços ideais de acordo com a modelagem.



Fonte: Acervo do autor

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho chegou ao seu objetivo de produzir um bloco de alvenaria de solo cimento com resistência mecânica em ensaios de compressão uniaxial e absorção de água compatíveis com o estabelecido pela NBR 10836/94 e 8492/12, para blocos com características de vedação.

- Os estudos realizados nos diferentes blocos produzidos foram possíveis desenvolver um bloco de solo cimento com características mais sustentáveis. Esse bloco contempla uma substituição de 3% em massa de solo por uma combinação de resíduos inorgânicos, neste mesmo bloco foram empregados apenas 16% em massa de cimento.
- Existe a possibilidade de outras combinações que podem serem empregadas na produção de blocos apropriados para uso na alvenaria de vedação. Todavia, a resistência mecânica e a absorção de água acabam sendo modificadas.
- Observou-se uma redução de aproximadamente 5% em massa de resíduos introduzidos nesse bloco, proporciona uma redução de aproximadamente 5% na absorção de água sem prejuízo a resistência mecânica.
- Por outro lado, comparando-se dois blocos com o mesmo nível de substituição, em torno de 3%, considerando um aumento de 5% em massa de cimento, observa-se que a resistência mecânica aumenta e a absorção de água cai 5%.
- No entanto, esse bloco mesmo apresentando-se com 5% melhor com relação as suas propriedades estudadas, não o qualifica como mais adequado, pois apenas o lodo de ETA coletado no período de chuva atinge condições adequadas segundo a norma para emprego em alvenaria de vedação. Portanto, o aumento na quantidade de cimento, nesse outro bloco segue na direção oposta aos objetivos sustentáveis do estudo.
- O bloco de alvenaria desenvolvido com aproximadamente 3,5Kg de massa total, conta com: 3% de Lodo de ETA, 16% de cimento e 80% de solo. Isso representa em uma casa, com três quartos que empregue 12.000 blocos na construção, uma introdução de 1,3 toneladas de Lodo de ETA por casa construída.
- O presente estudo evidencia que além de ser um tijolo adequado pela norma, sustentável por princípio e ecológico natureza ao propor que resíduos inorgânicos sem decomposição em condições normais ambientais, sejam descartados em aterros sanitários, ou ainda utilizados de outra forma, também inadequada.

- Somando-se a esses fatores, de acordo com a SEBRAE, o emprego de um bloco de solo cimento, sem resíduo na constituição, pode levar a uma economia de até 40% da obra.
- A possibilidade de emprego deste material no mercado é vantajosa para a sociedade por se tratar de um produto ecologicamente correto, contribuindo na resolução de problemas ambientais envolvendo o descarte inadequado de lodo na natureza, além de possibilitar vantagens econômicas

7 REFERÊNCIAS

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.

._____. NBR 10004/1994 - **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

._____. 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.

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

._____. NBR 7211/2005 – **Agregados para concreto – Especificação - Módulos de Finura**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

._____. 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.

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

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

._____. NBR NM 26/2009 – **Amostragem de agregados**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

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

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

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

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

._____. NBR NM 6457 – **Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro: 1986.

._____. 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.

ALMEIDA, Luiza Flores Soares de; ANACLETO, Marielly Gonçalves; COSTA, William Alessandro Camolesi da. **Estudo da viabilidade da utilização de lodo de ETA em blocos vazados de concreto por meio da avaliação de propriedades mecânicas e acústica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ALMEIDA, Marília Cunha; SILVA, Maiara Macêdo; DE PAULA, Marcelo. **Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água em relação à turbidez, cor e ph da água**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, v. 5, n. 1, p. 25-40, 2017.

AMORIM, E. (2013). **Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos**. Estudo de caso: Município de Campo Verde - MT. Tese (Doutorado), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, D.F., Brasil, 151p.

ANDREOLI, Cleverson Vitório; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. In: **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Editora UFMG 2ª Ed., 2014, vol. 6.

Associação Brasileira de Cimento Portland. **História**. ABCP. Disponível em: <www.abcp.org.br>. Acesso em: 28 ago. 2022.

BARRETO, Sheila Souza. **Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico**. 2020.

BATISTA, P. S., MARTINS, A. R. , CARVALHO, A. G. , GONTIJO NETO, T. M. , LIMA, A. T. G. , ARAUJO, A. R. , CARVALHO, F. B. , TEIXEIRA, C. M. , SANTANA, K. W. C. , LIMA, M. B. , TEIXEIRA, S. S. , SOUSA, W. O. . **Composição pulverulenta para a produção de tijolos de solo-cimento prensados hidráulicamente com a adição de Lodo de sulfato de alumínio com sedimentos inorgânicos na sua composição**. Brasil, 2017.

BECKERMAN, Wilfred. 'Sustainable development': is it a useful concept?. **Environmental values**, v. 3, n. 3, p. 191-209, 1994.

BESERRA, Eduardo B. *et al.* **Efeito da qualidade da água no ciclo de vida e na atração para oviposição de *Aedes aegypti* (L.) (Diptera: Culicidae)**. Neotropical Entomology, v. 39, n. 6, p. 1016-1023, 2010.

BLUCHER, E. (1951). **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários** – volume I. São Paulo, Blucher.

CAPUTO, Home P., CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos solos e suas aplicações - Volume III**. LTC: Rio de Janeiro, 2015, 7ª Edição, 2015.

CARVALHO, A. R. O.; POROCA, J. S. **Como fazer e usar tijolos prensados de solo estabilizado**. Brasília: IBICT, 1995.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios-Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, 2da Ed., vol. 5. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **CNPq**. Disponível em < <http://cnpq.br/painel-de-investimentos> > Acesso em 28 ago. 2022.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; SALES, Caroline Pessôa. **Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 55, p. 331-336, 2015.

CRUZ, Deborah Campos *et al.* **MELHORIA DA QUALIDADE DE TIJOLOS CERÂMICOS ATRAVÉS DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 2, n. 2, p. 042-056, 2016.

DE LIMA, Victor Hugo Moreira; DE LIRA, Jaíla Araujo Mendes; DA SILVA, Roberto Afonso. **Conscientização da política dos 3r's no parque metropolitano armando de Holanda cavalcanti**. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – ME: 082/94 – Solos – **Determinação do Limite de Plasticidade**.

DOMINGOS, Nadion Florindo; JUNIOR, Valtair Fernandes. **O DÉFICIT HABITACIONAL NO BRASIL FRENTE ÀS POLÍTICAS PÚBLICAS DE HABITAÇÃO**. Anais do Seminário Científico da FACIG, n. 2, 2017.

DOS REIS, Edson Luís Tocaia *et al.* **Identificação da influência do descarte de lodo de estações de tratamento de água.** Química Nova, v. 30, n. 4, p. 865, 2007.

EPA - United States Environmental Agency. **Building savings: Strategies for waste reduction of construction and demolition debris from buildings.** 2000.

Ferraz, André Luiz Nonato, and Antonio Anderson da Silva SEGANTINI. **"Engenharia sustentável: aproveitamento de resíduos de construção na composição de tijolos de solocimento."** Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural (2004).

GÖMZE, László A. *et al.* **Investigation of mineralogical composition and technological properties of conventional brick clays.** Epitoanyag-Journal of Silicate Based & Composite Materials, v. 70, n. 1, 2018.

HERCULANO, Selene Carvalho. **Do desenvolvimento (in) suportável à sociedade feliz. Ecologia, ciência e política.** Rio de Janeiro: Revan, p. 9-48, 1992.

HOPPEN, C. *et al.* **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental.** Cerâmica, 2005.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE.** Rio de Janeiro. 1934. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 28 ago. 2022.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **IPEA.** Brasília. 1964. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/>>. Acesso em 28 ago. 2022.

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.

KOS, Lech. **Effect of Using Coagulants on Sedimentation Sludge Properties and Quality of Textile Wastewater.** *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2017.

Leite, F.D.C., Motta, R.D.S., Vasconcelos, K.L. & Bernucci, L. (2011). **Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements.** *Constr. Build. Mater.*, 25(6): 2972–2979.

MARCO, Fabiane F. De; JACOSKI, Claudio A. **Estudo comparativo entre os capeamentos de neoprene, enxofre e pasta de cimento para corpos-de-prova cilíndricos de concreto.**

Salão de iniciação Científica (14.: 2002: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2002., 2002.

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. Sustentabilidade em Debate, v. 3, n. 1, p. 75-95, 2012.

MEDEIROS, Elisandra Nazaré Maia de. **Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA**. 2010.

MERCADO, M. C. (1991). **Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso**, São Paulo. Dissertação (Mestrado) – FAU USP.

MIRANDA, Gabriella Morais Duarte; MENDES, Antonio da Cruz Gouveia; SILVA, Ana Lucia Andrade da. **Desafios das políticas públicas no cenário de transição demográfica e mudanças sociais no Brasil**. Interface-Comunicação, Saúde, Educação, v. 21, n. 61, p. 309-320, 2017.

Neville, A. M, *et al.* **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013 .

NEWMAN, Bruce I.; SHETH, Jagdish N.; MITTAL, Banwari. **Comportamento do cliente: indo além do comportamento do consumidor**. Atlas, 2008.

NIMER, E. (1979) **Climatologia do Brasil**. Série Recursos Naturais e Meio Ambiente, no 4. Fundação IBGE. 421 p.

OHSHIMA, Hiroyuki. DLVO Theory of Colloid Stability. In: **Electrical Phenomena at Interfaces, Second Edition**,. Routledge, 2018. p. 119-136.

PAIXÃO, L. C. C. *et al.* **Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa** (Effect of addition of high iron content sludge from water treatment plant on a clay-based ceramic). Cerâmica, v. 54, n. 329, p. 63-76, 2008.

PEREIRA, Artur Henrique. **Avaliação da utilização de vidro comum como pozolana e avaliação da utilização de sucata de vidro temperado como agregado graúdo em concretos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PEREIRA, R. R. **Planejamento experimental e otimização de processos na definição de traço de concreto com resíduos para produção de tijolos**. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

Pinheiro, Fundação João. **Déficit habitacional no Brasil 2015: resultados preliminares** – Belo Horizonte, FJP, 2017.

Protimiza Experimental Design. Disponível em: <<http://experimental-design.protimiza.com.br>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

Ratkowsky, DA (1990) **Handbook of nonlinear regression models**. New York and Basel. Marcel Dekker, Inc. 241p.

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.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. E. **Planejamento de experiências e otimização de processos**. 2006.

Rodrigues, Waldecy, and Willian Cardoso Santana. "**Análise econômica de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos: o caso da coleta de lixo seletiva em Palmas, TO.**" urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana 4.2 (2012): 299-312.

RUDUIT, F. R.. **Resistência à Compressão de Amostras de Concreto: Comparação dos resultados entre a preparação de topos com capeamento de enxofre e retificação**. Trabalho de diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006.

SALA, L. G., **Proposta de Habitação Sustentável para Estudantes Universitários**. 2006. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006.

SALES, Almir; CORDEIRO, João Sérgio. Imobilização da fase sólida de lodos de estação de tratamento de água (ETAs). In: ANDREOLI, C.V. (Coordenador). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 282 p. 2001.

SANEP - **Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas**. Disponível em: <<http://www.pelotas.com.br/SANEP/SANEP/SANEP.htm>>. Acesso em 28 ago. 2022.

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 28 ago. 2022.

SILVA, M. V. D.; **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.

SUKSIRIPATTANAPONG, Cherdsak *et al.* **Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge.** Construction and Building Materials, v. 82, p. 20-30, 2015.

Supremo Cimentos **Secil**. CP IV 32 RS. Disponível em: < www.supremocimento.com.br>. Acesso em 28 ago. 2022.

TAFAREL, Nathann Francisco Francisco. **Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água.** Revista Matéria, v. 21, n. 4, p. 974-986, 2016.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** 2011.

VIERA, T. M. *et al.* **Influência da dimensão do corpo de prova de concreto e da forma de capeamento, nos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.** In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Salvador–BA. Setembro. 2008.

ZAMBIAZI, R.C. **Análise Físico Química de Alimentos.** Pelotas: Editora Universitária/UFPEL, 202p. 2010. SAS Institute. System for Information, versão 8.0. Cary, 2007. 1 CD Rw.