

UNIVERSIDADE VALE DO RIO DOCE - UNIVALE
NÚCLEO DAS CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Carolina Oliveira Lima
Pedro Henrique Camelo

Uso de rejeitos de mineração para produção de tijolos de solo-cimento

Governador Valadares /MG

2020

CAROLINA OLIVEIRA LIMA
PEDRO HENRIQUE CAMELO

USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso I
apresentado ao Curso de Engenharia Civil e
Ambiental da Universidade Vale do Rio Doce

Orientador: Rondinely Geraldo Pereira.

Co-orientadora: Andreza de Andrade
Marciano Machado.

Governador Valadares /MG

2020

RESUMO

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – Minas Gerais, descarregou toneladas de rejeitos de mineração no meio ambiente, poluindo o rio Doce e impactando toda flora, fauna e comunidades inseridas neste meio. Dentre as áreas atingidas está a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, situada às margens do rio Doce, estrada de acesso à Santana do Deserto – MG. O presente trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade técnica da utilização do solo com rejeitos de mineração dragado da UHE Risoleta Neves na produção de tijolos de solo-cimento, como alternativa para mitigação dos impactos causados pela ruptura da barragem. A pesquisa foi realizada por meio de ensaios laboratoriais, seguindo os requisitos das normas pertinentes à produção dos tijolos de solo-cimento. Os ensaios realizados com as amostras de solo constataram que o mesmo não apresenta as características ideais para a produção dos tijolos devido as suas concentrações granulométricas, necessitando a estabilização com cimento Portland. Dessa forma, foram produzidos tijolos nos traços 1:4, 1:5 e 1:6 e através do controle tecnológico verificou-se que apenas o traço 1:4 atende a todos os requisitos estabelecidos em norma. Assim, o solo coletado da UHE Risoleta Neves é adequado para a produção dos tijolos desde que produzido no traço definido pela pesquisa.

1 INTRODUÇÃO

O setor minerário configura-se como um instrumento propulsor do desenvolvimento econômico mundial, sendo essencial para a sobrevivência humana, a economia e o desenvolvimento de tecnologias indispensáveis à modernidade atual (NAVES; FERNANDES, 2015). Apesar de ser um importante setor na economia do país, as atividades caracterizam-se pelo alto potencial degradador do meio ambiente, podendo causar impactos ambientais, sociais e econômicos.

No século XX e, mais particularmente, nos últimos 50 anos, a ocorrência de desastres relacionados à ruptura de barragens vem crescendo mais rapidamente do que a capacidade de redução da vulnerabilidade das pessoas (FREITAS *et. al.*, 2016). Os impactos e riscos mais significativos associados ao setor minerário são relativos às barragens de rejeitos em consequência de problemas de gestão de segurança.

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015 na cidade de Mariana – Minas Gerais, provocou a deposição de grande quantidade de rejeito de mineração ao longo do Rio Doce, causando impactos ambientais, sociais e econômicos. Com o rompimento da barragem, foi lançado ao meio ambiente milhões de metros cúbicos de rejeitos, provocando impactos irreparáveis.

Diante do cenário atual entre esse setor relevante para o desenvolvimento econômico do país, faz-se necessário a busca por materiais e métodos construtivos sustentáveis. Dessa forma, o reaproveitamento dos rejeitos de minério mostra-se como uma solução para minimizar os impactos naturais.

Com intuito de minimizar os impactos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, o presente trabalho propõe o emprego dos materiais retirados da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (localizada na estrada de acesso à Santana do Deserto KM 12 – Zona Rural) na fabricação de tijolos ecológicos que, com a abundância de rejeitos no cenário local, possibilitaria o emprego na fabricação de alvenarias para construção civil.

Para a execução dos estudos de caracterização do solo e produção dos tijolos de solo-cimento foram realizados ensaios laboratoriais, seguindo os critérios e procedimentos estabelecidos pelas normas.

2 JUSTIFICATIVA

O setor de mineração representa uma parcela significativa na exploração dos recursos minerais, gerando um volume na faixa de milhões de metros cúbicos de rejeitos durante o processo de beneficiamento do minério, que são condicionados nas barragens sem fins de utilização (Souza Júnior, Moreira e Heineck, 2018). Diante do cenário atual, a tragédia causada pelo rompimento da barragem de Fundão, a busca por alternativas para mitigar os impactos causados pela deposição do rejeito nas margens do Rio Doce é de suma importância.

O tijolo de solo-cimento destaca-se por apresentar baixa agressão ao meio ambiente devido ao seu processo de fabricação, sendo conhecido como tijolo ecológico. Diferente dos tijolos comuns, eles apresentam menor impacto ambiental, que estão relacionados principalmente à matéria prima, geração de resíduos, baixo custo e emissão de CO₂.

No processo de fabricação dos tijolos de solo-cimento, o solo é o material que apresenta maior proporção, necessitando uma correta escolha. Para isso é necessário realizar a caracterização mecânica do solo, que determinará suas propriedades quanto à distribuição granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica e retração.

A estabilização do solo é outro fator fundamental no processo de confecção dos tijolos de solo-cimento, pois as propriedades mecânicas dos solos diferem entre si e nem todos apresentam os requisitos mínimos estabelecidos por norma para utilização em solo-cimento. A estabilização do solo ocorre através da incorporação de aditivos como o cimento, que através de reações químicas entre as partículas do solo obtêm-se propriedades aproximadas do que se pretende para a produção dos materiais de solo-cimento (MILANI,2008).

O teor de umidade e o grau de compactação do solo-cimento é importante para a obtenção de um tijolo com qualidade, pois interfere no resultado das características de resistência à compressão e absorção de água. O teor de umidade é dado pelo ensaio de Proctor, no qual é encontrado um valor de umidade ótima correspondente a densidade máxima do material com uma dada energia de compactação. Conforme Picchi et al.(1990), deve-se trabalhar com teores de umidade próximo ao ótimo, pois acarretam a máxima densidade do

sistema e, conseqüentemente, a maior resistência e durabilidade do tijolo de solo-cimento.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) recomenda moldar tijolos com proporção de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14. O traço ideal é aquele que consumir a menor quantidade de cimento atendendo aos critérios de resistência à compressão e absorção de água prescritos na norma NBR 8491/2013. Segundo a norma, as amostras não podem apresentar valores médios de resistência à compressão inferior a 2,0 MPa e valores individuais abaixo de 1,7 MPa, com idade mínima de cura de 7 dias. A absorção de água da amostra não deve ser superior a 20% de seu volume e nenhum valor individual superior a 22%.

De acordo com Sala (2006) o tijolo de solo-cimento apresenta as seguintes vantagens:

- a) O custo final da obra pode ser reduzido cerca de 31%;
- b) Economia de até 50% no custo final da parede;
- c) Redução de cerca de 50% no tempo de construção;
- d) Redução substancial no desperdício de material, especialmente concreto e massa de assentamento;
- e) Durabilidade maior que qualquer outro tipo de alvenaria;
- f) Não requer argamassa no assentamento dos blocos;
- g) Menor peso: economia na fundação.

A viabilização do uso de rejeito de mineração na fabricação do tijolo de solo-cimento é verificada a partir do estudo do solo, que consiste na caracterização mecânica, estabilização, dosagem experimental, produção eficiente e controle tecnológico. Mostrando-se viável a utilização de rejeito de mineração na produção dos tijolos de solo-cimento pode configurar uma alternativa econômica, ambiental e socialmente sustentável para mitigação dos impactos causados pelo rompimento da barragem de Fundão e, desta forma, podendo ser empregado na fabricação de alvenarias para construção civil.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Propor uma alternativa para mitigação de impactos gerados pela deposição de rejeitos de mineração nas margens do Rio Doce, através da utilização de solos com rejeitos retirados da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, avaliando as propriedades do rejeito como possível insumo na produção de tijolos de solo-cimento.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Verificar as características mecânicas de amostras de solo alterado com rejeito de mineração, dragado da UHE Risoleta Neves, disposto nos depósitos da usina;
- b) Realizar o processo de estabilização do solo de forma a torna-lo apropriado para o uso como matéria-prima na produção de tijolos de solo-cimento;
- c) Realizar a dosagem experimental e propor um traço para a produção dos tijolos ecológicos;
- d) Produzir tijolos de solo-cimento conforme especificações da ABNT e realizar o controle tecnológico dos mesmos de forma a atingir os requisitos normativos.

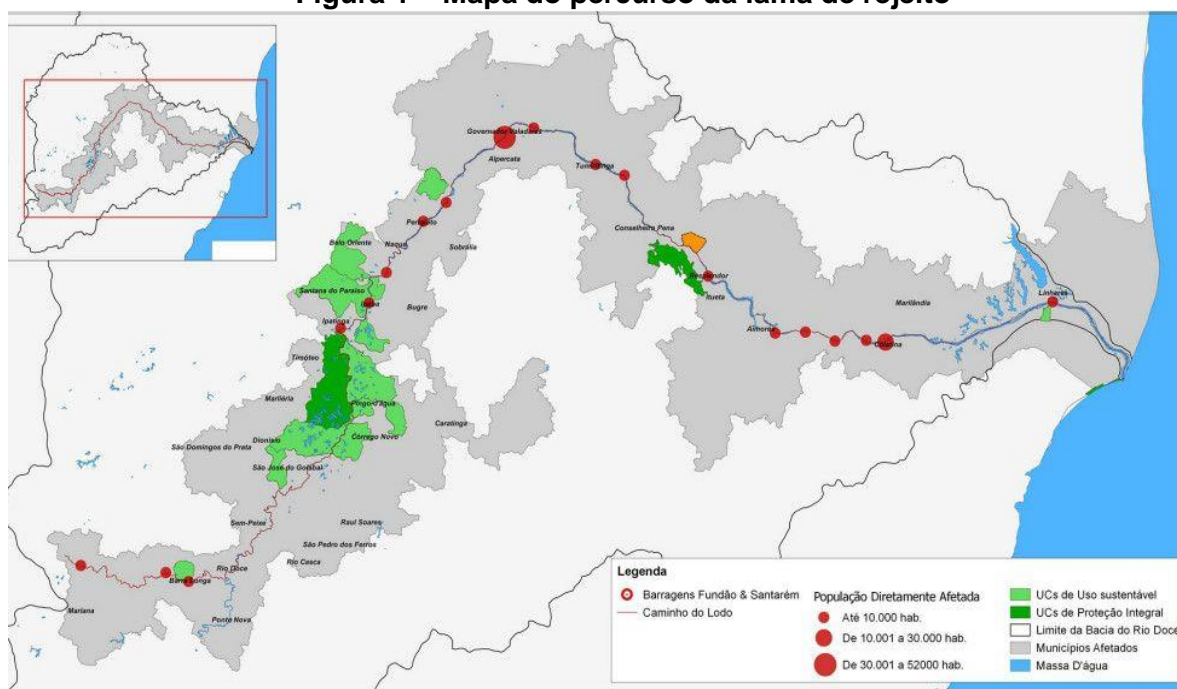
5 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

5.1 ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – MG

No dia 05 de novembro de 2015, ocorreu, em proporção de grande escala, o rompimento da barragem de Fundão, no subdistrito de Bento Rodrigues pertencente a Mariana – MG, considerado como o maior desastre socioambiental do estado de Minas Gerais. A barragem de fundão fazia parte de um complexo de barragens e operavam segundo um sistema tradicional, aterro hidráulico, empregado mundialmente. O rompimento descarregou em apenas onze minutos cerca de 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos, causando uma tragédia humana e ambiental difícil de avaliar (GONÇALVES; FUSCO; VESPA, 2016).

De acordo com a BBC Brasil (2015), a lama de rejeitos atingiu o curso do rio Doce percorrendo em média 700 km, entre o local de ruptura e a foz do rio Doce, no estado do Espírito Santo (FIGURA 1); destruindo comunidades, áreas de preservação permanentes e a biodiversidade aquática e terrestre.

Figura 1 – Mapa do percurso da lama de rejeito



Fonte: BBC (2015)

Conforme o Conselho Nacional de Direitos Humanos (CNDH), a tragédia “deixou 17 mortos e mais de 600 pessoas desabrigadas e desalojadas, além dos demais impactos socioeconômicos e ambientais” (CNDH, 2017, p.4). O desastre afetou diversos cursos d’água, sendo a bacia do rio Doce a mais afetada, apresentando perdas irreversíveis, como rios e riachos assoreados, destruição da flora e fauna, afetando toda a biodiversidade local-regional e as diversas famílias que viviam da pesca e agricultura e o habitat dos povos indígenas (BORGES, 2018).

5.2 IMPACTOS DOS REJEITOS DA MINERAÇÃO

O setor minerário do Brasil representa uma porcentagem significativa na economia do país através da comercialização nacional e internacional, suprindo com matérias primas diversos setores, como exemplo as indústrias da construção civil (SOUZA JUNIOR, 2018). Apesar da sua influência e importância na movimentação financeira do país, suas atividades geram grandes problemas ambientais às mineradoras devido ao grande volume de rejeito durante o processo de exploração e extração do minério de ferro (FERREIRA et al., 2016).

Para conter a grande quantidade de rejeitos provenientes dos processos de exploração e extração do minério de ferro, as mineradoras utilizam as barragens de contenção. Conforme Souza Junior, Moreira & Heineck (2018), O Brasil possui 839 barragens registradas, sendo 43,5 % localizadas no estado de Minas Gerais. A relevância das questões ambientais assumiu maiores proporções na década de 80, considerando o potencial dano ambiental devido à instabilidade física das barragens de contenção (DUARTE, 2008).

Pereira (2005) afirma que os impactos associados à ruptura de barragens de contenção de rejeitos podem interferir no meio físico e na biota. Esses impactos são:

- a) Alteração do relevo local, a degradação e remoção de camadas de solo superficial;
- b) Assoreamento das águas e mananciais;
- c) Comprometimento de áreas de vegetação;

- d) Indução e aceleração de processos erosivos;
- e) Turvamento dos corpos hídricos;
- f) Interferências sobre o nível freático local;
- g) Introdução de soluções ácidas nas águas;
- h) Comprometimento da qualidade do ar.
- i) Riscos associados à degradação de áreas destinadas às habitações e edificações;
- j) Redução de vazão do curso d'água;
- k) Comprometimento da qualidade das águas destinadas ao abastecimento público;
- l) Questões socioeconômicas associadas à perda de vidas humanas.

Com o rompimento da barragem de Fundão, milhões de metros cúbicos de rejeito de minério foram descarregados no meio ambiente. Conforme o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a presença de lama de rejeitos de mineração no meio ambiente pode contaminar o solo alterando sua estrutura química e impactar às matas ciliares. A qualidade da água ao longo do percurso afetado foi altamente modificada, provocando a suspensão dos materiais sedimentados no fundo dos rios e elevada concentração de metais pesados, substâncias nocivas à saúde dos seres vivos, tornando a água tóxica para os seres aquáticos, terrestres e humana e, através da dessedentação e bioacumulação, ameaçando a existência dos seres vivos (IBAMA, 2015).

5.3 SOLO

Os solos são resultantes do processo de intemperismo das rochas devido a desintegração mecânica ou química das rochas (CAPUTO, 1988). Ainda segundo o autor, a desintegração mecânica ocorre através de agentes como água, temperatura e vento, formando pedregulhos, areia e silte, e em condições especiais podendo formar argilas. Na decomposição química há alteração mineralógica das rochas de origem, sendo o principal agente a água e os

principais mecanismos de deterioração da rocha a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação.

A classificação do solo é feita de acordo com as dimensões de suas partículas. Os diferentes tipos de solo e a variação dos diâmetros dos grãos são apresentados na tabela 2.

Tabela 1 – Diâmetro dos grãos

| Tipo de solo | Argila | Silte | Areia Fina | Areia Média | Areia Grossa | Pedregulho |
|-------------------------|-----------|--------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| Diâmetro dos Grãos (mm) | Até 0,005 | 0,005 a 0,05 | 0,05 a 0,15 | 0,15 a 0,84 | 0,84 a 4,8 | 4,8 a 16 |

Fonte: ABNT NBR 6502, 1995. Adaptada pelos autores

Um dos fatores importante para caracterizar o solo é quanto a sua plasticidade, que consiste na maior ou menor capacidade de moldar o solo sob certas umidades. Os limites de consistência, também denominados limites de Atterberg, definindo o limite de contração como o menor teor de umidade em que o solo passa de seu estado semi-sólido para sólido; o limite de plasticidade como sendo o teor de umidade abaixo do qual o solo adquire uma condição semi-plástica, tornando-se quebradiço; o limite de liquidez como sendo o teor de umidade que separa o estado de consistência líquida do plástico e o IP como sendo o teor de umidade dentro do qual o solo possui características plásticas (MILANI, 2008).

5.4 SOLO-CIMENTO

O solo-cimento é uma mistura de solo com aglomerante hidráulico artificial, cimento Portland e água, que compactado na umidade ótima e densidade máxima, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do aglomerante (ABCP, 2000).

Segundo Grande (2003), as pesquisas com solo cimento ganharam destaque no Brasil a partir da década de 1930, com a regulamentação do seu

uso pela ABCP. Inicialmente empregado na construção de bases e sub-base de pavimentos de estradas.

Em 1929, Proctor descobriu a relação umidade/peso específico aparente na compactação do solo, dando início o desenvolvimento do solo-cimento para diversas aplicações na construção civil, tais como: pavimentação, revestimento de canais, diques, reservatórios, barragens de terra, estabilização de taludes, tijolos, blocos, painéis e paredes monolíticas (BAUER, 1994).

Segundo Milani (2008), o solo-cimento na construção destaca-se na forma de tijolos prensados, passando pelas fases de destorroamento, peneiramento, secagem do solo, mistura homogênea do solo e cimento Portland, adição de água, prensagem da mistura em prensas manuais ou hidráulicas, desforma e cura úmida.

5.4.1 Aplicação do Solo cimento

Para Lima (2010), o emprego do solo cimento apresenta vantagens econômicas, devido a abundância do solo, principal constituinte da mistura, o baixo custo de produção, redução de argamassas e isenção de mão de obra especializada e vantagens ambientais, devido a não necessidade de queima, reduzindo a emissão de CO₂.

No Brasil, de acordo com Lima (2010), os principais usos do solo cimento são:

- a) Parede monolítica: o solo é compactado no próprio local, em sucessivas camadas, no sentido vertical, com auxílio de formas e guias, formando painéis sem juntas horizontais.
- b) Tijolos ecológicos: são produzidos através da prensagem manual ou hidráulica, dispensando o processo de queima. Os tijolos podem ser maciços ou vazados, apresentando elevada resistência e excelente aspecto.
- c) Pavimentos: os quais são compactados no local, com auxílio de fôrmas, mas em única camada, constituindo placas maciças totalmente apoiadas no chão.

5.4.2 Tijolo de solo-cimento

Os tijolos de solo-cimento são também conhecidos como tijolos ecológicos e é uma alternativa para a construção de alvenarias, apresentando diversas vantagens quando comparados aos tijolos convencionais.

Segundo Sala (2006), O tijolo ecológico ou de solo-cimento é feito de uma mistura de solo cimento, que depois são prensados; seu processo de fabricação não exige queima em forno à lenha, o que evita desmatamentos e não polui o ar, pois não lança resíduos tóxicos no meio ambiente. Para o assentamento, no lugar de argamassa comum é utilizada uma cola especial

Para Motta (2014) um dos benefícios da utilização de tijolos ecológicos é a “redução de custos, do consumo de água, de energia, além de propulsar o desenvolvimento de novos produtos que contribuam para o mercado”. Motta (2014) afirma que o tijolo de solo-cimento pode ser montado através de encaixe, facilitando o assentamento, reduzindo o tempo de execução e a quantidade de argamassa ou cola empregada. Outra característica de alvenarias construídas com tijolo ecológico é a redução do seu peso, diminuindo o dimensionamento das fundações e apresenta-se como um material resistente, durável e impermeável.

De acordo com a ABCP (2000) as principais vantagens do tijolo de solo-cimento são:







- a) Pode ser produzido com solo do local da aplicação, reduzindo ou eliminando o custo de transporte;
- b) Utiliza equipamentos simples;
- c) Não consome combustível no processo de fabricação, por dispensar a queima;
- d) A regularidade de suas fôrmas, a planeza e as lisuras de suas faces requerem argamassa de assentamento ou cola em espessura mínima e uniforme;
- e) Pode dispensar o uso de revestimento, desde que protegidos da ação da água;
- f) Não necessita de mão de obra especializada;
- g) Possui resistência à compressão simples similar aos tijolos convencionais.

Apesar de ser um método milenar, a técnica de tijolos de solo-cimento requer um cuidado especial, pois a mineralogia que caracteriza suas propriedades é variável, necessitando um estudo para cada tipo de solo (ALEXANDRE, ALVES e LIMA, 2010). Assim, os cuidados são:

- a) Constituição do traço;
- b) Traço adotado, baseando-se em resultados indicados por norma;
- c) Método de preparo e cura do material;
- d) Conhecimento e adoção de novas tecnologias;
- e) Adoção de novos princípios de desenho urbano, topologia, infraestrutura, equipamento urbanos;
- f) Sistema construtivo adequado;
- g) Utilização de recursos adequados;
- h) Treinamento de mão de obra aproveitando as capacidades locais;
- i) Avaliação permanente do modelo quanto às tecnologias adotadas;
- j) O conforto térmico
- k) Os efeitos sobre o ecossistema local, a água e a atmosfera;
- l) Efeito sobre as culturas locais, etc.

Os tijolos de solo-cimento apresentam diversas vantagens, sendo uma opção construtiva que visa à diminuição de impactos ambientais e redução de custos e suas características técnicas atendem aos requisitos de desempenho para sua aplicação na construção civil. No Brasil são fabricados diversos tipos de tijolos de dimensões e modelos variados, que são empregados conforme a necessidade do projeto, como apresentado no quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de tijolo de solo-cimento

| Tipo | Dimensões | Uso | Exemplo |
|---------------------------------|--|--|---|
| Tijolo maciço comum | (5 x 10 x 20) cm | Assentamento de alvenaria semelhante ao tijolo convencional |  |
| Tijolo maciço com encaixe | (5 x 10 x 21) cm | Assentamento com baixo consumo de argamassa |  |
| ½ tijolo com encaixe | (5 x 10 x 10,5) cm | Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras. |  |
| Tijolo com dois furos e encaixe | (5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm | Assentamento a seco, com cola rança ou argamassa plástica. As tubulações das instalações hidro-sanitárias, elétricas e outras, passam pelo furos |  |
| ½ tijolo com furo e encaixe | (5 x 10 x 10) cm (7 x 12,5 x 12,5) cm (7,5 x 15 x 15) cm | Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras. |  |
| Caneletas | (5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm | Empregado em execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagem de tubulações horizontais |  |

Fonte: Lima, 2010.

5.4.3 A importância do uso do solo-cimento

Estudos apontam que a produção de tijolo de solo-cimento, também conhecido como “tijolo ecológico” é uma alternativa de reaproveitamento de resíduos, principalmente provenientes da construção civil, como a utilização de

escória de alto-forno de aciaria (envelhecida), gesso químico, calcário semi-calcinado, refugo de moagem de Blocos refratários (CASANOVA, 2004).

Os tijolos solo-cimento são constituídos de uma mistura de argila, cimento e água, sendo estes materiais prensados por prensas manuais ou hidráulicas, dispensando qualquer possibilidade de queima é, portanto, visto como favorável nas construções de casa para população de baixa renda (CORDEIRO; CONCEIÇÃO; LIMA, 2006).

Um dos pontos mais importantes da fabricação dos tijolos de solo-cimento é a possibilidade da utilização de resíduos como um material de sua composição. Para Lima (2013), uma das atividades mais eficientes para mitigar a extração de recursos naturais é a produção de materiais a partir do uso de materiais reutilizados.

Diante do cenário de tragédias ambientais, como de Mariana, a fabricação do tijolo de solo-cimento com o aproveitamento dos rejeitos de mineração acumulado ao longo do curso d'água, situados nas matas ciliares nas margens do rio Doce, seria uma alternativa sustentável, onde envolverá aspectos econômicos, por ser de baixo custo, sendo que não necessita de queima, diminuindo também o consumo de energia em sua fabricação, já sobre o aspecto social, proporcionará a muitas famílias o acesso a moradia e servirá também como uma fonte de renda para essas famílias.

6 MATERIAIS E METODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos necessários para a confecção dos tijolos de solo cimento, baseados nas NBR's vigentes sobre cada ensaio.

Inicialmente foram realizados ensaios para a capacitação dos estagiários do projeto Renovação e estudo preliminar do solo com rejeito de minério, no período de junho/2018 a junho/2019. Após esse período, outros dois estagiários deram continuidade nos estudos, realizando todos ensaios de classificação do solo e a produção e controle tecnológico dos tijolos de solo-cimento.

Todos os ensaios e moldagem dos tijolos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do projeto Renovação e Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, localizado no Centro Tecnológico Científico (CTC) da Universidade Vale do Rio Doce – UNIVALE.

Foram realizadas as etapas de caracterização das amostras de solo e verificação das características físicas e mecânicas dos tijolos de solo-cimento. Os ensaios laboratoriais são necessários para a constatação da viabilidade técnica e econômica da produção do tijolo solo-cimento com solo contaminado de rejeitos de minério.

6.1 MATERIAIS

6.1.1 Água

A água é um elemento fundamental nos processos de produção do tijolo de solo cimento, permitindo o adensamento do material durante a prensagem e é ativadora das propriedades de aglomerante hidráulica do cimento.

Segundo a NBR 10833:2012, a água utilizada nos ensaios e produção dos tijolos deve estar livres de impurezas que possam prejudicar a hidratação do cimento. Para a execução da pesquisa foi utilizada água potável, encontrando-se em conformidade com a NBR 10833:2012.

6.1.2 Cimento

Segundo a NBR 10833:2012, o cimento Portland utilizado na fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica devem atender às ABNT NBR 5732, ABNT NBR 5733, ABNT NBR 5736 e ABNT NBR 11578.

Foi utilizado o cimento Portland CP III, marca Cauê, facilmente encontrado no mercado local e que apresenta as características compatíveis para a produção de tijolos e blocos de solo-cimento.

6.1.3 Solo

O solo utilizado, com rejeitos de minério provenientes do rompimento da barragem de Fundão em Mariana - MG, foi coletado na Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, situada no rio Doce, no KM 12 na Zona Rural, estrada de acesso à Santana do Deserto. Antes de utilizado, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado, conforme procedimentos da NBR 6457:2016.

6.2 METODOLOGIA

A análise da viabilidade técnica e econômica do emprego do solo com rejeitos de mineração na produção de tijolos de solo-cimento baseou-se na NBR 10833 (ABNT, 2012) que estabelece os procedimentos necessários para a fabricação de tijolos de solo-cimento com prensa manual ou hidráulica.

O solo destinado à fabricação de tijolos de solo-cimento com prensa manual ou hidráulica devem atender as seguintes características:

- a) 100% da amostra passando na peneira com abertura de 4,75 mm, de acordo com a ABNT NBR NM ISSO 3310-1;
- b) 10% a 50% do solo passando na peneira com abertura de 0,075 mm, de acordo com a ABNT NBR NM ISSO 3310-1;
- c) limite de liquidez (LL) menor ou igual a 45%;
- d) índice de plasticidade (IP) menor ou igual a 18%.

6.2.1 Coleta do solo com rejeito de minério

As amostras de solo foram recolhidas do pátio da Fundação Renova na Fazenda Floresta, localizada na área rural do município de Rio Doce – Minas Gerais, sendo que o material dragado estava acondicionado em sacos plásticos de 20 Kg. As amostras foram transferidas para os recipientes de 200 litros, fechados hermeticamente e transportados até o laboratório para realização da pesquisa (figura 2).

Figura 2 – Coleta das amostras com auxílio de Colaboradores da Fundação Renova



Fonte: Os autores

6.2.2 Preparo das amostras de solo

O preparo das amostras foi realizado conforme os procedimentos descritos pela NBR 6457:2016 que consiste em secar a amostra ao ar, até próximo a umidade higroscópica (figura 3).

Figura 3 - Secagem da amostra para realização dos ensaios.



Fonte: Os autores

Logo após é feito o destorroamento do solo, seguido do quarteamento e peneiramento da amostra, tornando-o adequado para a realização dos ensaios, conforme figura 4.

Figura 4 – Destorroamento do solo



Fonte: Os autores

Após peneirado, as amostras de solo foram separadas seguindo as proporções definidas para cada ensaio de caracterização de solo (figura 5).

Figura 5 – Separação das amostras de solo.



Fonte: Os autores

6.2.3 Caracterização do solo com rejeito de minério

A classificação das amostras de solo dragado da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves foi realizada através dos seguintes ensaios laboratoriais: granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez e teste da caixa.

6.2.3.1 Granulometria por peneiramento fino

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a NBR 7181:2016 – Solo – Análise Granulométrica.

Para a realização da análise granulométrica foram necessários: amostra de solo preparada de acordo com a NBR 6457:2016: peneiras com aberturas de malhas 4.8, 2.0, 1.2, 0.6, 0.42, 0.25, 0.15 e 0.075 mm; estufa capaz de manter temperatura exigida pela norma; agitador mecânico de peneiras; escovas com cerdas metálicas; balanças sensível e cápsulas metálicas.

Figura 6 – Conjunto de peneiras e agitador mecânico.



Fonte: Os autores

6.2.3.2 Análise granulométrica – Dispersão total

Devido as características pulverulentas do material, o ensaio de granulometria mostrou-se pouco preciso, necessitando a realização do ensaio de granulometria por sedimentação.

O ensaio de granulometria (Dispersão total) pelo método da pipeta permitiu analisar as texturas do solo, aferindo a porcentagem de areia grossa, areia fina, silte e argila. O método baseia-se na velocidade de queda das partículas que compõe o solo. Fixou-se o tempo de deslocamento vertical na

solução do solo com água após a adição de um dispersante químico e em seguida, é retirado um volume da suspensão para determinação do percentual de argila. Por seguinte, o silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100%.

Figura 7 – Material suspenso.



Fonte: Os autores

6.2.3.3 Limite de plasticidade

Para execução do ensaio, a amostra de solo foi preparada conforme os procedimentos da ABNT NBR 6457. O ensaio foi realizado seguindo as orientações da NBR 7180:2016, que determina os seguintes materiais: Amostra de solo, cápsula de porcelana, cápsula metálica, peneira com abertura de 0,42 mm, água, placa de vidro de superfície esmerilada, balança de precisão e cilindro com 3 mm de diâmetro.

A porção de solo foi colocada em uma cápsula de porcelana e acrescentou-se água até a homogeneização da mistura (Figura 8a), obtendo uma consistência plástica. Em seguida, foi separada uma pequena porção da massa plástica moldando-a na placa de vidro buscando atingir o diâmetro de 3 mm do cilindro (figura 8b).

Figura 8 – (a) Homogeneização da amostra de solo (b) Moldagem da amostra .



(a)

(b)

Fonte: Os autores

6.2.3.4 Limite de liquidez

Para a realização do ensaio, o solo foi preparado conforme a ABNT NBR 6457. O ensaio foi realizado segundo os procedimentos descritos pela NBR 6459:2016, como apresentado na figura 9.

Figura 9 – Proceimentos para ensaio de determinação do limite de liquidez.



Fonte: Os autores

Neste ensaio, foi utilizado os seguintes materiais: amostra de solo, água, aparelho de Casagrande, cinzel, cápsula de porcelana, peneira com malha de 0,42 mm, par de vidro côncavo, balança com resolução de 0,01g, cápsulas de metal e espátula com lâmina flexível.

A amostra preparada previamente foi colocada em um recipiente de porcelana e adicionou-se água até a homogeneização da amostra, de forma que proporcionasse 35 golpes para fechar a ranhura. Em seguida, a massa plástica foi colocada na concha do aparelho de Casagrande, devidamente calibrado, e com auxílio de um cinzel foi feita uma canelura. Assim, foi realizado os golpes de maneira a obter uma ranhura em média de 13 mm.

6.2.3.5 Teste da caixa

Segundo Neves (2005), o teste da caixa mede a retração linear do solo, indicando o seu comportamento quanto à retração volumétrica para a fabricação de tijolos de solo-cimento, devendo ser abaixo de 20 mm.

O ensaio foi realizado seguindo as orientações do BT-111 – Fabricação de tijolos de solo-cimento. Para realização do ensaio, utilizou-se 10 Kg de solo e água suficiente para atingir consistência de argamassa de reboco. A mistura foi colocada na caixa de madeira com dimensões de 60x8,5x3,5 cm, previamente lubrificada, até encher. Após a realização dos procedimentos, a caixa foi deixada em repouso em ambiente fechado e protegido do sol por 7 dias.

Figura 10 – Verificação da retração do solo.



Fonte: Os autores

6.3 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

6.3.1 Dosagem

Conforme as diversas literaturas o procedimento de dosagem é totalmente experimental devido a heterogeneidade do solo. Para o procedimento de dosagem experimental, o boletim técnico da ABCP e a NBR 10833:2012 citam traços usuais para fabricação de tijolos de solo-cimento, 1:10, 1:12 e 1:15, sendo que a eficiência dos mesmos deve ser verificada através dos ensaios mecânicos prescritos pela NBR 8491:2013. Quando não utiliza os traços usuais a norma recomenda o preparo de pelo menos três traços, e conforme os resultados dos ensaios é definido o traço que melhor atende as características desejadas. Para este trabalho foram utilizados três traços, 1:4, 1:5 e 1:6, com produção de 30 tijolos, com rompimento previsto de 28 dias.

6.3.2 Produção

6.3.2.1 Preparo da mistura

A produção dos tijolos de solo-cimento foi realizada com base nas orientações da ABCP (2000), no seu Boletim Técnico nº 111, que define os procedimentos necessários para a fabricação dos tijolos. Primeiramente, o solo foi seco ao ar e depois passado na peneira de abertura de 4,8 mm, eliminado todo material retido. Em seguida, através de uma argamassadeira, misturou-se o solo e o cimento nas proporções definidas de cada traço (Figura 11).

A adição da água ocorreu gradativamente, garantindo uma boa distribuição sobre a mistura de solo e cimento, até que atingisse a umidade ideal. A umidade foi verificada apertando uma porção da mistura entre os dedos, e que ao abrir a mão, a porção de solo deveria manter-se compactada, e quando separadas em duas partes não deveria desagregar.

Figura 11 – Mistura do solo-cimento.



Fonte: Os autores.

Esta fase do processo é fundamental, pois a quantidade de água interfere na prensagem e resistência da mistura. O excesso de água ao solo-cimento pode causar perda de resistência e a falta de água dificulta a prensagem e também causa perda de resistência do solo-cimento compactado.

Figura 12 – Verificação da umidade ideal.



Fonte: Os autores.

Após atingir a umidade ideal, a mistura foi peneirada novamente em uma peneira com abertura de 4,8 mm, proporcionando maior homogeneidade (figura 13).

Figura 13 – Peneiramento da mistura de solo-cimento.



Fonte: Os autores.

6.3.2.2 Prensagem da mistura

Logo após o peneiramento da mistura, a NBR 10833:2012 exige a transferência imediata para a prensa, evitando perda de umidade. Para a prensagem dos tijolos, foi utilizada uma prensa manual (figura 14). A mistura de solo-cimento foi colocada no dosador da prensa e, logo em seguida, realizado a prensagem da mistura. O tijolo produzido foi disposto em uma superfície plana, lisa e protegida do sol.

Figura 14 – Prensagem do tijolo de solo-cimento.



Fonte: Os autores.

As dimensões dos tijolos fabricados foram de 250x125x70 mm (CxLxA), conforme figura 15. Segundo a NBR 8491:2012, as dimensões nominais que os tijolos de solo-cimento devem atender constam na Tabela 1 desta norma, porém podem apresentar dimensões diferentes das estabelecidas nesta tabela, desde que o tijolo permaneça com altura menor que a largura.

Após a moldagem do tijolo de solo-cimento, foi realizada a cura durante os sete primeiros dias.

Figura 15 – Tijolo de solo-cimento.



Fonte: Os autores.

6.4 CONTROLE TECNOLÓGICO

Os ensaios de inspeção visual, resistência à compressão simples e absorção de água foram realizados nos tijolos seguindo os procedimentos definidos pela NBR 8492:2012.

6.4.1 Ensaio de compressão simples

No ensaio de resistência à compressão simples os tijolos devem ser cortados ao meio e unidos por uma camada fina de pasta de cimento pré-contraída, sendo que a resistência da pasta de cimento não poderá ser inferior à do tijolo (figura 16).

Figura 16 – Capeamento dos tijolos de solo-cimento.



Fonte: Os autores.

Após o processo de capeamento, os tijolos foram imersos em um tanque contendo água por no mínimo 6 horas. Ao fim do período de imersão, retirou-se o excesso de água com um pano levemente umedecido. As dimensões dos tijolos foram determinadas com exatidão e o tijolo foi colocado no centro do prato inferior da prensa de compressão (figura 17). A aplicação da carga deve ser uniforme a uma razão de 500 N/s (Kgf/s).

Figura 15 – Rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Os autores.

O resultado do ensaio é obtido pela divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal. A média aritmética dos valores individuais corresponde ao valor médio de resistência à compressão.

Os resultados são analisados conforme os critérios estabelecidos pela NBR 8491:2012, que determina a resistência média dos tijolos de solo-cimento igual ou superior a 2,0 MPa, e que os valores individuais não podem ser inferiores a 1,7 MPa.

6.4.2 Ensaio de absorção de água

Para realização do ensaio de absorção de água foi utilizado três corpos de prova restantes da amostra utilizada. Os corpos de prova foram secos em estufa até atingir constância de massa (figura 18). Posteriormente, as amostras foram imergidas em água por um período de 24 horas. Assim, após a remoção das amostras do tanque de água, elas foram secas superficialmente, e pesadas novamente, obtendo a massa saturada.

Figura 18 – Ensaio de absorção de água



Fonte: Os autores.

Os valores individuais de absorção de água são obtidos a partir da equação $A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$, onde:

A: é a absorção de água expressa em porcentagem;

m1: é a massa seca expressa em gramas;

m2: é a massa saturada expressa em gramas.

Segundo a NBR 8491:2012, as amostras ensaiadas não podem apresentar a média de valores de absorção de água superior a 20% e nem valores individuais maiores que 22%.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO

7.1.1 Granulometria por peneiramento fino

Os resultados obtidos pelo ensaio granulométrico por peneiramento fino estão expressos na tabela 2.

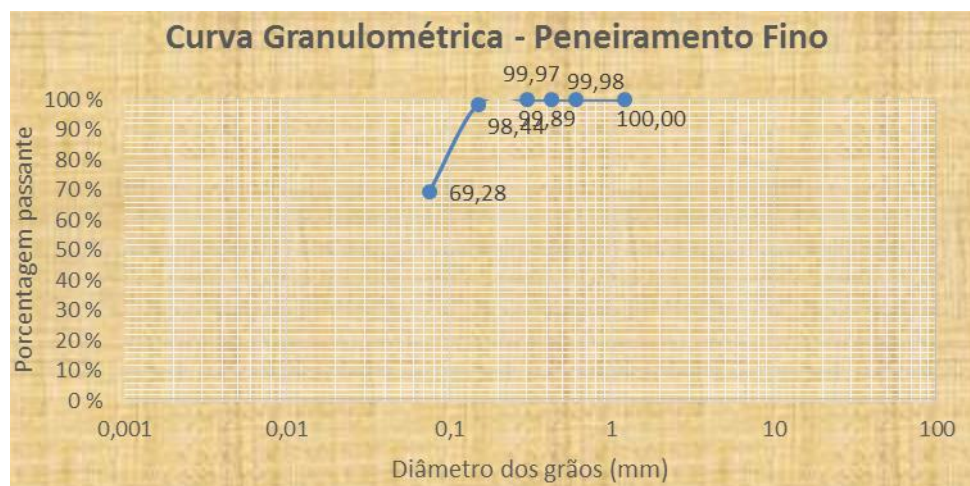
Tabela 2 - análise granulométrica peneiramento fino

| Abertura (mm) | Peso Retido (g) | % Retido -Acumulado | % Passante |
|---------------|-----------------|---------------------|------------|
| 2 | 0,000 | 0,00 | 100,00 |
| 1,2 | 0,000 | 0,00 | 100,00 |
| 0,6 | 0,020 | 0,02 | 99,98 |
| 0,425 | 0,020 | 0,03 | 99,97 |
| 0,3 | 0,090 | 0,11 | 99,89 |
| 0,15 | 1,740 | 1,56 | 98,44 |
| 0,075 | 35,000 | 30,73 | 69,28 |
| 0 | 83,130 | 100,00 | 0,00 |
| Total | 120 | - | - |

Fonte: Os autores.

Para melhor compreensão dos resultados, é apresentado o gráfico 1 em escala logarítmica.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica Peneiramento Fino



Fonte: Os autores

A porcentagem de material que passa na peneira de 0,0075 mm não atende as especificações da Associação Brasileira de cimento Portland que indica uma porcentagem de 10% a 50% de material passante como adequado, podendo então ser classificado como silte ou argila. Dessa forma, faz necessário a realização do ensaio de granulometria por sedimentação para classificar as concentrações de cada material.

7.1.2 Análise Granulométrica – Dispersão Total

Proposto pela EMBRAPA no manual de Métodos de análise do solo (1997), o ensaio é intitulado Análise Granulométrica (Dispersão Total), onde foi seguido o método da pipeta. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Areia grossa = 0,15%

Areia fina = 34,03%

Silte = 65,22%

Argila = 0,60%

Os resultados foram obtidos pela pesagem das amostras seca em estufa, resultando em um baixo teor de argila e areia grossa e elevado teor de silte.

7.1.3 Limite de Liquidez

Este ensaio determina o teor de umidade acima do qual o solo apresenta comportamento líquido. Os resultados obtidos estão contidos na tabela 3.

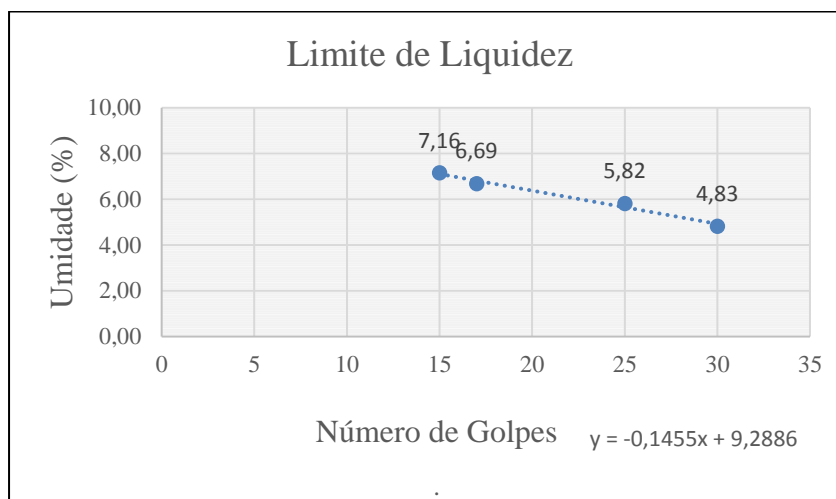
Tabela 3 – Limite de liquidez do solo

| Cápsula | Tara (g) | Pw + Tara (g) | Peso Solo Úmido (g) | Ps + Tara (g) | Peso Solo Seco (g) | Número de Golpes | Hora - Inserção na Estufa | Data | Umidade (%) | LL (%) |
|---------|----------|---------------|---------------------|---------------|--------------------|------------------|---------------------------|------------|-------------|--------|
| 26 | 17,44 | 24,740 | 7,3 | 23,600 | 6,160 | 30 | 18h15min | 09/04/2019 | 4,83 | 6 |
| 160 | 18,83 | 25,290 | 6,46 | 23,900 | 5,070 | 25 | 18h15min | 09/04/2019 | 5,82 | |
| 186 | 21,190 | 33,960 | 12,77 | 31,830 | 10,640 | 17 | 18h15min | 09/04/2019 | 6,69 | |
| 189 | 17,93 | 29,050 | 11,12 | 27,110 | 9,18 | 15 | 18h15min | 09/04/2019 | 7,16 | |
| 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |

Fonte: Os autores.

Com os resultados obtidos pelo ensaio, obtêm-se um gráfico em que a abscissa representa o número de golpes e a ordenada o teor de umidade. O limite de liquidez é o teor de umidade correspondente aos 25 golpes.

Gráfico 2 – Resultado limite de liquidez



Fonte: Os autores

Através do gráfico 2, o limite de liquidez, que é o teor de umidade correspondente a 25 golpes é de 5,82%. Dessa forma, amostra ensaiada atende às especificações do limite de liquidez, conforme item 3 do BT 111 – Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a utilização de Prensas Manuais, cuja é requerido um Limite de Liquidez $\leq 45\%$.

7.1.4 Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade é definido como o teor de umidade no qual o solo passa de seu estado plástico para semi-sólido. Os resultados estão expressos na tabela 4.

Tabela 4 – Limite de plasticidade do solo

| Cápsula | Tara (g) | Pw + Tara (g) | Peso Solo Úmido (g) | Ps + Tara (g) | Peso Solo Seco (g) | Hora - Inserção na Estufa | Data | Umidade (%) | LP (%) |
|---------|----------|---------------|---------------------|---------------|--------------------|---------------------------|------------|-------------|--------|
| 157 | 16,99 | 21,04 | 4,05 | 20,510 | 3,52 | 18h15min | 09/04/2019 | 2,58 | 2 |
| 158 | 16 | 20,5 | 4,50 | 19,910 | 3,91 | 18h15min | 10/04/2019 | 2,96 | |
| 163 | 18,96 | 23,53 | 4,57 | 22,93 | 3,97 | 18h15min | 09/04/2019 | 2,62 | |
| 164 | 19,11 | 23,040 | 3,93 | 22,54 | 3,43 | 18h15min | 09/04/2019 | 2,22 | |
| 185 | 18,84 | 22,61 | 3,77 | 22,160 | 3,32 | 18h15min | 09/04/2019 | 2,03 | |

Fonte: Os autores:

O limite de plasticidade é a média aritmética de pelo menos três valores que não diferem da média em mais que 5%.

Apesar dos valores encontrados na tabela, considera-se o solo como Não Plástico (NP), devido a impossibilidade de formar um cilindro com diâmetro de 3mm.

A partir dos valores do limite de liquidez e plasticidade pode-se obter o Índice de plasticidade (IP), que é a diferença das porcentagens de LL e LP.

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 6 - NP$$

$$IP = NP \text{ (Não Plástico)}$$

O resultado do limite de plasticidade sendo NP (Não Plástico), resulta em um índice de plasticidade NP (Não Plástico).

7.1.5 Teste da caixa

Após o período de sete dias depois da realização do teste da caixa (figura 19) foram realizadas as aferições das retrações.

Constatou-se que a amostra não atende às especificações de retração do solo, conforme o item 3 do BT 111 – Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais, o qual delimita que a retração total é de 2 cm não podendo apresentar trincas na amostra.

Figura 19 – Retrações nas amostras.



Fonte: Os autores.

7.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇO

Os traços iniciais, 1:10 e 1:12, foram definidos a partir dos resultados de caracterização do solo, porém apresentaram resultados não satisfatórios. A partir dos resultados dos traços anteriores, definiu-se que o traço 1:5 seria o ponto de partida, então foram escolhidos três traços, sendo eles 1:4, 1:5 e 1:6. Tendo como objetivo, a conciliação dos requisitos para aceitação conforme as normas técnicas e também a viabilidade econômica.

7.3 PRODUÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Para confecção dos tijolos nos traços 1:4, 1:5 e 1:6, foram coletados aproximadamente 400 quilogramas de solo contaminado na Usina Hidrelétrica Risoleta Neves para a produção dos tijolos de solo-cimento.

7.4 ENSAIO DE ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise adimensional consiste na aferição das dimensões dos tijolos. No ensaio foram medidos três pontos distintos de cada dimensão do tijolo, e o resultado foi a média aritmética simples dos três valores. Os valores de análise dimensional estão expressos nas tabelas 5, 6 e 7, para os traços 1:4, 1:5 e 1:6.

Tabela 5 – Análise dimensional traço 1:4

| CP | Comprimento (mm) | | | | Largura (mm) | | | | Alltura (mm) | | | |
|----|------------------|-----|-----|-------|--------------|-----|-----|-------|--------------|----|----|-------|
| | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 2 | Média |
| 1 | 251 | 250 | 250 | 250,3 | 124 | 126 | 124 | 124,7 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 2 | 250 | 250 | 250 | 250,0 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 3 | 250 | 250 | 250 | 250,0 | 124 | 124 | 124 | 124,0 | 69 | 70 | 70 | 69,7 |
| 4 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 125 | 125 | 124 | 124,7 | 70 | 69 | 71 | 70,0 |
| 5 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 70 | 71 | 71 | 70,7 |
| 6 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 69 | 70 | 70,0 |
| 7 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 71 | 70 | 70 | 70,3 |
| 8 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 124 | 125 | 124,3 | 70 | 71 | 72 | 71,0 |
| 9 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 10 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 11 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 70 | 70 | 70 | 70,0 |
| 12 | 251 | 250 | 251 | 250,7 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 69 | 70 | 70,0 |
| 13 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 125 | 124 | 125 | 124,7 | 70 | 70 | 69 | 69,7 |
| 14 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 124 | 125 | 124,3 | 70 | 70 | 69 | 69,7 |
| 15 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 72 | 70 | 71,0 |

Fonte: Os autores

Tabela 6 – Análise dimensional traço 1:5

| CP | Comprimento (mm) | | | | Largura (mm) | | | | Alltura (mm) | | | |
|----|------------------|-----|-----|-------|--------------|-----|-----|-------|--------------|----|----|-------|
| | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 2 | Média |
| 1 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 70 | 69 | 69 | 69,3 |
| 2 | 250 | 250 | 251 | 250,3 | 125 | 125 | 124 | 124,7 | 70 | 70 | 71 | 70,3 |
| 3 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 71 | 70 | 70,7 |
| 4 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 124 | 126 | 125 | 125,0 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 5 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 125 | 125 | 124 | 124,7 | 70 | 70 | 70 | 70,0 |
| 6 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 125 | 124 | 124 | 124,3 | 69 | 69 | 69 | 69,0 |
| 7 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 125 | 125 | 124 | 124,7 | 71 | 71 | 70 | 70,7 |
| 8 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 9 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 71 | 70 | 71 | 70,7 |
| 10 | 250 | 250 | 250 | 250,0 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 69 | 69 | 70 | 69,3 |
| 11 | 250 | 250 | 250 | 250,0 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 70 | 70 | 69 | 69,7 |
| 12 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 70 | 69 | 70 | 69,7 |
| 13 | 251 | 251 | 250 | 250,7 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 71 | 71 | 71 | 71,0 |
| 14 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 124 | 124,3 | 69 | 70 | 70 | 69,7 |
| 15 | 250 | 251 | 250 | 250,3 | 124 | 125 | 125 | 124,7 | 70 | 69 | 69 | 69,3 |

Fonte: Os autores

Tabela 7 – Análise dimensional traço 1:6

| CP | Comprimento (mm) | | | | Largura (mm) | | | | Alltura (mm) | | | |
|----|------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 3 | Média |
| 1 | 251 | 251 | 250,5 | 250,8 | 124,5 | 124,5 | 123 | 124 | 68,5 | 69,5 | 69 | 69,0 |
| 2 | 250,5 | 251 | 251,5 | 251,0 | 124,5 | 125 | 124 | 124,5 | 69,5 | 69,5 | 70 | 69,7 |
| 3 | 251 | 251 | 251 | 251,0 | 124 | 125 | 123,5 | 124,2 | 71,5 | 71 | 71 | 71,2 |
| 4 | 250 | 251 | 250,5 | 250,5 | 122,5 | 124,5 | 124 | 123,7 | 70 | 70,5 | 70,5 | 70,3 |
| 5 | 250,5 | 251 | 251 | 250,8 | 123,5 | 125 | 124,5 | 124,3 | 73,5 | 72 | 70 | 71,8 |
| 6 | 250,5 | 250,5 | 250,5 | 250,5 | 125 | 125,5 | 123,5 | 124,7 | 71 | 71,5 | 70 | 70,8 |
| 7 | 250,5 | 251 | 251 | 250,8 | 123 | 125 | 124 | 124,0 | 68,5 | 70,5 | 69 | 69,3 |
| 8 | 250 | 250 | 250 | 250,0 | 126,5 | 125 | 124 | 125,2 | 70 | 70 | 69,5 | 69,8 |
| 9 | 251 | 250,5 | 251 | 250,8 | 124,5 | 125 | 124 | 124,5 | 70,5 | 69 | 68 | 69,2 |

Fonte: Os autores

7.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão simples é uma das principais características que define a qualidade dos tijolos. Segundo a NBR 10834 os valores médios de resistência à compressão simples devem ser maiores que 2,0 MPa, não podendo apresentar valores individuais de resistência abaixo que 1,7 MPa.

Os valores de resistência à compressão simples podem ser visualizados na tabela abaixo:

Tabela 7 – Resistência à compressão traço 1:4

| CP | Medida da face de trabalho (mm) | | Área da face de trabalho (mm ²) | Carga aplicada (tnf) | Carga aplicada (N) | Tensão de ruptura (MPa) |
|--------------|---------------------------------|-----|---|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 125 | 121 | 15125 | 6,38 | 62566,4 | 4,1 |
| 2 | 123 | 122 | 15006 | 6,66 | 65312,3 | 4,4 |
| 3 | 124 | 124 | 15376 | 6,67 | 65410,4 | 4,3 |
| 4 | 125 | 122 | 15250 | 6,08 | 59624,4 | 3,9 |
| 5 | 122 | 124 | 15128 | 6,07 | 59526,4 | 3,9 |
| 6 | 122 | 121 | 14762 | 6,36 | 62370,3 | 4,2 |
| 7 | 121 | 125 | 15125 | 6,52 | 63939,4 | 4,2 |
| MÉDIA | | | | | | 4,1 |

Fonte: Os autores

O valor médio de resistência à compressão simples dos tijolos fabricados com traço 1:4 foi de 4,1 MPa, superior ao estabelecido pela norma, sendo satisfatório a sua utilização.

Tabela 8 – Resistência à compressão traço 1:5

| CP | Medida da face de trabalho (mm) | | Área da face de trabalho (mm ²) | Carga aplicada (tnf) | Carga aplicada (N) | Tensão de ruptura (MPa) |
|--------------|---------------------------------|-----|---|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 121 | 121 | 14641 | 5,74 | 56290,2 | 3,8 |
| 2 | 124 | 121 | 15004 | 6,45 | 63252,9 | 4,2 |
| 3 | 123 | 124 | 15252 | 5,52 | 54132,7 | 3,5 |
| 4 | 123 | 122 | 15006 | 4,83 | 47366,1 | 3,2 |
| 5 | 123 | 121 | 14883 | 5,66 | 55505,6 | 3,7 |
| 6 | 124 | 123 | 15252 | 4,96 | 48641,0 | 3,2 |
| 7 | 121 | 123 | 14883 | 4,66 | 45699,0 | 3,1 |
| MÉDIA | | | | | | 3,5 |

Fonte: Os autores

O valor de resistência à compressão simples dos tijolos fabricados com traço 1:5 foi de 3,5 MPa, superior ao estabelecido pela norma, sendo satisfatório sua utilização.

Tabela 9 – Resistência à compressão traço 1:6

| CP | Medida da face de trabalho (mm) | | Área da face de trabalho (mm ²) | Carga aplicada (tnf) | Carga aplicada (N) | Tensão de ruptura (MPa) |
|--------------|---------------------------------|-------|---|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 123,8 | 127,4 | 15772,12 | 3,44 | 33734,9 | 2,1 |
| 2 | 122 | 140 | 17080 | 1,09 | 10689,2 | 0,6 |
| 3 | 127 | 124 | 15748 | 5,02 | 49229,4 | 3,1 |
| 4 | 123 | 127 | 15621 | 3,24 | 31773,5 | 2,0 |
| 5 | 123 | 125 | 15375 | 4,37 | 42855,1 | 2,8 |
| 6 | 127 | 124 | 15748 | 5,04 | 49425,5 | 3,1 |
| 7 | 124 | 121 | 15004 | 3,57 | 35009,7 | 2,3 |
| MÉDIA | | | | | | 2,3 |

Fonte: Os autores

Os valores de resistência à compressão simples dos tijolos fabricados com o traço 1:6 não atendeu as especificações da norma que exige valor individual de resistência superior a 1,7 MPa. Apesar da média ter atendido, o fato do corpo de prova (CP) 2 ter apresentado 0,6 MPa de resistência, não permite o uso dos tijolos com este traço.

7.6 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Segundo a NBR 10834:2012, os valores médios de absorção de água podem ser no máximo de 22% e individuais inferiores a 20%. Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados nas tabelas abaixo.

Tabela 10 – Absorção de água traço 1:4

| CP | Massa Úmida (Kg) | Massa Seca (Kg) | Absorção de Água (%) |
|--------------|------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 3,465 | 2,890 | 19,90 |
| 2 | 3,500 | 2,920 | 19,86 |
| 3 | 3,550 | 2,959 | 19,97 |
| MÉDIA | | | 19,91 |

Fonte: Os autores

Tabela 11 – Absorção de água traço 1:5

| CP | Massa Úmida (Kg) | Massa Seca (Kg) | Absorção de Água (%) |
|--------------|------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 3,470 | 2,860 | 21,33 |
| 2 | 3,450 | 2,850 | 21,05 |
| 3 | 3,410 | 2,810 | 21,35 |
| MÉDIA | | | 21,24 |

Fonte: Os autores

Tabela 12 – Absorção de água traço 1:6

| CP | Massa Úmida (Kg) | Massa Seca (Kg) | Absorção de Água (%) |
|--------------|------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 3,483 | 2,906 | 19,84 |
| 2 | 3,258 | 2,639 | 23,47 |
| 3 | 3,315 | 2,713 | 22,17 |
| MÉDIA | | | 21,83 |

Fonte: Os autores

O valor médio de absorção de água dos tijolos com traço 1:4 foi de 19,91%, atendendo ao estabelecido pela norma.

O valor médio de absorção de água dos tijolos com traço 1:5 foi de 21,24%, superior ao estabelecido pela norma. Dessa forma, o traço 1:5 não atende à este requisito.

O valor médio de absorção de água dos tijolos com traço 1:6 foi de 21,83%, superior ao estabelecido pela norma. Dessa forma, o traço 1:6 não atende à este requisito.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana – Minas Gerais, descarregou milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no meio ambiente, atingindo a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves. Essas áreas afetadas pela ruptura da barragem sofreram impactos incalculáveis, uma vez que foram atingidas matas ciliares, fauna terrestre e aquática, a flora e as comunidades. Para mitigar esses impactos, o trabalho propõe a fabricação de tijolos de solo-cimento com o solo dragado da UHE Risoleta Neves, para utilização na construção civil, e podendo proporcionar às comunidades atingidas novas oportunidades e geração de emprego e renda.

A verificação da viabilidade técnica do bloco foi realizada através de ensaios laboratoriais, que consistem nos ensaios de granulometria, Limites de Atterberg, teste da caixa, análise dimensional, resistência à compressão simples e absorção de água. A primeira verificação da viabilidade técnica da utilização de rejeitos de minério para produção de tijolos ecológicos foi feita com os traços 1:10 e 1:12, porém não foi possível moldar os tijolos devido a falta de coesão dos materiais, necessitando acrescentar mais cimento e diminuir a quantidade de solo, de modo a obter uma mistura mais coesa. Para isso, optou-se por confeccionar os tijolos nos traços 1:4, 1:4 e 1:6.

Para os traços escolhidos, os resultados dos ensaios apontaram o traço 1:4 como o ideal, pois atendeu aos requisitos normativos referentes a análise dimensional, resistência à compressão simples e absorção de água.

Conclui-se que o solo coletado na Usina Hidrelétrica Risoleta Neves é adequado para a utilização na fabricação de tijolos de solo-cimento no traço definido pelo trabalho. Assim, é comprovado que os tijolos são tecnicamente viáveis para utilização como insumos na construção civil e, dessa forma, esta produção de tijolos pode configurar uma estratégia sustentável para mitigação de impactos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (Sao Paulo, SP). Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com a utilização de prensas hidráulicas. 2.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1989. 8p. (BT, 112)

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (Sao Paulo, SP). Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000. 19p. (BT, 111)

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6459: Solo- Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6502: Solo- Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 7180: Solo – determinação da plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7181: Solo – Analise granulométrica. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8492**: Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 10007: Amostra de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 10834: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 10836: 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, 2013.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. Volume II. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1994.

BBC BRASIL. **O que já se sabe do impacto da lama de Mariana – MG**. Disponível em:<https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/12/151201_dados_mariana_cc#:~:text=O%20incidente%20liberou%20cerca%20de,causando%20danos%20ambientais%20e%20sociais.>. Acesso em: 02 out.2020.

BORGES, Sérgio. O desastre da barragem de rejeitos em Mariana, Minas Gerais: aspectos socioambientais e de gestão na exploração de recursos minerais. **Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía**, 2018, 27.2: 301-312.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Volume II. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1988.

CASANOVA, F. J. **O solo como Material de Construção**. 5º Encontro de Engenharias da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 22 a 25 nov. 2004. CD-ROM.

CONSELHO NACIONAL DE DIREITOS HUMANOS (CNDH). **Relatório final - Rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce**. 2017, P.4. Disponível em http://www.mdh.gov.br/mdh/informacao-ao-cidadao/participacao-social/conselho-nacional-de-direitos-humanos/cndh/copy2_of_RelatriodaBarragemdoRioDoce_FINAL_APROVADO.pdf. Acesso em set. 2020.

CORDEIRO, Martha E. V. M.; CONCEIÇÃO, Patrícia Marluci da; LIMA, Thiago Vicente. A educação ambiental e o uso do solo-cimento. **Revista Vértice**, V.8, n. 1/3, jan./dez. 2006.

DIAS, Carlos Alberto, et al. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço, UFVJM**, 2018, 21-35.

DUARTE, A. P. (2008). **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em saneamento, meio-ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, 114p.

FERREIRA, K. C., et al. Estudos do aproveitamento de rejeitos de um minério de ferro Itabirítico da região de Morro do Pilar/iron ore residue use as raw materials for the manufacture of mortar. **HOLOS**, 2016, 32.2: 77.

GOMES, Ana Cláudia Franca. (2017). **Estudo de reaproveitamento de rejeito de Mineração**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, 84p.

GONÇALVES, Eduardo; FUSCO, Nicole; VESPA, Talyta. **Tragédia em Mariana: Para que não se repita**. Revista Veja. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/especiais/tragedia-em-mariana-para-que-nao-se-repita/>. Acesso em: 02 out. 2020.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos molares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa. 2003**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. Brasil. 165p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Lauda Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão**, em Mariana, Minas Gerais. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2015.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduos de granito**. 2010. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Brasil, 107p.

LIMA, Fabíolla Xavier Rocha Ferreira. **Tijolos de terra compactada de solo cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações.** 2013.

MILANI, Ana Paula da Silva. (2008). **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 175p.

MONTEIRO FILHA, Dulce Corrêa; COSTA, Ana Cristina Rodrigues da; ROCHA, Érico Rial Pinto da. Perspectivas e desafios para inovar na construção civil. In: **BNDES Setorial n. 31.** Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010. p.353-410.

MOTTA, Jessica Campos Soares Silva et al. **Bloco de solo-cimento: Análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas sustentáveis.** E-xacta, v.7, n. 1, p. 13-26, 2014.

NEVES, Célia. **“O uso do solo-cimento em edificações. A experiência do CEPED”.** V SIACOT – Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra (2005).

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** 2005. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais. Brasil, 210p.

PICCHI, F. A.; CINCOTTO, M. A.; BARROS, J. M. C. Tijolos de solo-cal. **Revista A Construção**, São Paulo, p.93-8, 1990. Tecnologia de edificações IPT / Ded90.

SOUZA JUNIOR, T. F.; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S.. Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil. **HOLOS**, v.05, 2018.

SALA, L. G. **Proposta de Habitação Sustentável para Estudantes Universitários.** 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006, 39 p.

SILVA, E. P., J. NASCIMENTO, W. B.; BARBOSA, N. P.; LEAL A. F. Avaliação de painéis de tijolos prensados de solo-cimento incorporados com resíduos de calçados (EVA). **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v.3.2 (2008). Disponível em: <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista>. Acesso em: 04 out. 2020.