

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Tese de Doutorado

**APLICAÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO NA
PRODUÇÃO DE TIJOLO DE SOLO-CIMENTO**

Autora: Ana Cláudia Franca Gomes
Orientadora: Prof^a. Dra. Sônia Denise Ferreira Rocha

Belo Horizonte
Março/2021

Ana Cláudia Franca Gomes

**APLICAÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO NA
PRODUÇÃO DE TIJOLO DE SOLO-CIMENTO**

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM) da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientadora: Prof^a. Dra. Sônia Denise Ferreira Rocha

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2021

G633a Gomes, Ana Cláudia Franca.
Aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento [recurso eletrônico] / Ana Cláudia Franca Gomes. – 2021.
1 recurso online (156 f.: il., color.): pdf.

Orientadora: Sônia Denise Ferreira Rocha.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f. 151-156.
Bibliografia: f. 138-150.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de Minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Economia Mineral – Teses. 4. Desenvolvimento sustentável - Brasil–
Teses. 5. Indústria Mineral – Teses. I. Rocha, Sônia Denise Ferreira.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Metalúrgica, Materiais e de Minas



Tese intitulada "**Aplicação de Rejeito de Mineração de Ouro na Produção de Tijolo de Solo-cimento**", área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pela candidata **Ana Cláudia Franca Gomes**, para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

Profª Sônia Denise Ferreira Rocha
 Orientadora - Drª (UFMG)

Prof. Douglas Batista Mazzinghy
 Dr. (UFMG)

Profª Rísia Magriotis Papini
 Drª (UFMG)

Profª Adriana Guerra Gumieri
 Drª (UFMG)

Profª Juliana Queiroz Borges de Magalhães Chegury
 Drª (UFMT)

Prof. Paulo Henrique Souza Almeida
 Dr. (UFMT)

Prof. Rodrigo Lambert Oréfice
 Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 22 de março de 2021

DEDICATÓRIA

“O que você obtém ao atingir seus objetivos não é tão importante
quanto o que você se torna ao atingir seus objetivos!”
Henry David Thoreau

Aos meus pais Cláudio e Rose, pelo carinho e pelo apoio!

Nada resiste ao trabalho!

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

Aos meus pais, Cláudio e Rose, irmãos, Lucas e Carol, e sobrinha, Mabi, por todo o apoio e assistência, por acreditarem em mim!

À estimada professora Sônia, pela sua orientação que me permitiu superar dificuldades e enriquecer este trabalho, por acreditar e apoiar o meu projeto quando ele ainda não passava de um esboço;

Agradeço ao Vitor, Gabriel, Valdinei pai e Valdinei filho pela imensa ajuda na parte prática desse trabalho;

Aos professores e técnicos do DEMIN que sempre foram solícitos e me ensinaram muito com as suas experiências. Em destaque: Alberto Afonso, Andreia Henriques, Douglas Mazzinghy, George Valadão, Ilda e Isabel Batista, Luiz Cláudio, Paulo Brandão, Paulo Viana, Pedro Campos, Michel Melo e Roberto Galery;

Um agradecimento especial à professora Rísia Magriotis Papini que sempre acreditou no meu trabalho e no meu sonho de ser professora! Ela é uma grande inspiração para mim!

Aos meus colegas do PPGEM e do MinPenV, pelos bons momentos durante o período de execução desse projeto e pelas novas amizades, em especial: Alice, Anderson, Carol, Cida, Dircilene, Elbert, Emily, Getúlio, Guilherme, Isadora, Lucas, Mário, Patrícia e Priscila;

Aos meus amigos que foram essenciais neste processo. Por me ajudarem nas crises de ansiedade, pelos conselhos, revisões, discussões e ideias. Em especial: Agnes, Camila, Carlos, Carol, Dalila, Elaine, Eraldo Júnior, Ilce, Felipe, Juliana, Juliane, Kelly, Leandro, Mariana, Marina, Paulo, Perla, Roberto, Thales e Vanessa. Quem tem amigos, tem tudo!

Aos professores e técnicos da UFMT que me auxiliaram nas análises realizadas! Em especial: Adriano, Fabiani, Ivan, Leonardo, Rafaela, Rogério e Vítor;

Aos queridos da Engenharia de Minas Arnaldo, Fidel, Luiz e Rafael, que me ajudaram neste trabalho; sem eles, a execução do mesmo seria muito mais difícil!

Nem tenho palavras para agradecer aos meus amigos André, Carol e Rafael pela sua ajuda durante todo o meu doutorado!

Ao Daniel e a família Miranda Cruz por tornarem a minha rotina muito mais agradável e alegre!

À CAPES, e ao CNPq pelo suporte financeiro, pelas instalações e equipamentos necessários nessa jornada, sem este apoio nada seria possível!

As minhas queridas UFMG e UFMT e a todos que acreditam na educação!

Obrigada Deus, que mesmo em um país com tantas injustiças e desigualdades, me proporcionou o privilégio de estudar e cruzar o caminho de tantas pessoas especiais!

RESUMO

O sistema produtivo atual ainda funciona de forma linear, com a exploração excessiva de recursos naturais e grande acúmulo de resíduos. Uma das formas de diminuir a pressão sobre estes recursos é aplicar o conceito de economia circular na mineração, que incentiva a utilização de rejeitos como insumos para a produção de novos produtos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de rejeito de mineração de ouro em pequena escala na produção de tijolos de solo-cimento vazados. Para tal, foram avaliadas misturas compostas por cimento, rejeito e solo coletados no município de Peixoto de Azevedo, em Mato Grosso-Brasil, na Zona Bioclimática 8. Os tijolos de solo-cimento são materiais de construção em terra que vem ganhando destaque pelas suas vantagens ambientais. No Brasil, a norma técnica NBR 8491 especifica valores para a resistência à compressão e absorção de água destes tijolos. Entretanto, as caracterizações ambiental e térmica deste material constituem avaliações importantes, uma vez que estão relacionadas a periculosidade e ao conforto térmico habitacional destes componentes de alvenaria. Como resultado do presente estudo, observou-se que quanto maior a fração solo, maior a resistência à compressão (f_t) e menor a absorção de água (A) do tijolo. A mistura 1:5:5 adição de 50% de solo alcançou valores de $f_t = 3,1$ MPa e $A = 17,0\%$, atendendo ao especificado pela NBR 8491. Os tijolos formados por essa mistura passaram por avaliação ambiental segundo a NBR 10004 em que foram classificados como não perigosos, porém, não inertes, devido ao teor elevado de alumínio. A caracterização química e mineralógica da mistura apontou fases de hidratação do cimento que estão relacionadas a estabilização de contaminantes tais como o cianeto. Sobre os resultados obtidos na caracterização térmica, um corpo de prova construído com tijolos com adição de 50% de solo foi avaliado em relação a absorvância (α), por meio do espectrômetro ALTA II, e a transmitância térmica (U) e resistência térmica (R_T) pelo *hot box method* (ISO 9869). Os resultados permitiram o cálculo da capacidade térmica (C_T), do atraso térmico (φ) e do fator solar (F_{SO}) do corpo de prova os quais foram comparados aos pré estabelecidos pelas normas brasileiras NBR 15575-4 e NBR 15220 para a Zona Bioclimática 8. Como resultado, o corpo de prova apresentou valores de $\alpha = 0,71$, $U = 2,47$ Wm⁻²K⁻¹, $C_T = 273,43$ kJm⁻²K⁻¹, $\varphi = 6,02$ h e $F_{SO} = 6,81\%$, atendendo os requisitos da primeira normativa, mas sendo reprovados pela segunda. Entretanto, a pintura dos tijolos com cores mais claras poderia diminuir o valor de α ou mesmo a incorporação de uma camada de argamassa de revestimento na face externa ou interna do corpo de prova contribuiria na elevação do seu atraso térmico (φ). Por fim, o rejeito estudado demonstrou o seu uso potencial como matéria-prima na fabricação de tijolos de solo-cimento por atender as especificações da NBR 8491. Sugere-se a continuidade dos estudos utilizando maiores proporções de solo ou cimento sempre balizados pela avaliação ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de garimpo de ouro; Mineração sustentável; Economia circular na mineração; Tijolo ecológico; Caracterização de rejeito.

ABSTRACT

Our current production system works in a linear way, allowing the overexploitation of natural resources and large accumulation of waste. One way to reduce pressure on such resources is to apply the concept of circular economy in mining, which encourages the use of tailings as input for the production of new products. The aim of this work was to evaluate the use of gold mining tailings in the production of soil-cement bricks formed by cement, tailings and soil (collected in Peixoto de Azevedo – Mato Grosso, Brazil, in the Bioclimatic Zone 8). Soil-cement bricks are earth building materials that are gaining prominence for their environmental advantages. In Brazil, the technical standard NBR 8491 covers values for the compressive strength (f_t) and water absorption (A) of these bricks. However, the environmental and thermal characterizations of this material constitute important assessments, since they are related to the hazard and the thermal comfort of these masonry components. It was observed that the higher the soil fraction, the greater the compressive strength (f_t) and the lower the water absorption (A) of the brick. The mixture with the addition of 50% of soil reached values of $f_t = 3.1\text{MPa}$ and $A = 17.0\%$. However, even if it meets the specifications of NBR 8491, each mining tailing has unique characteristics of hazardousness. Therefore, the brick with 50% of soil was evaluated according to NBR 10004 in which it was classified as non-dangerous, but not inert due to the high content of aluminum. The chemical evaluation showed phases of cement hydration that are related to the stabilization of contaminants such as cyanide. On the results obtained in the thermal characterization, a specimen was built with the bricks with the addition of 50% of soil in which the absorptance (α) was evaluated using the ALTA II spectrometer, and its thermal transmittance (U) and thermal resistance (R_T) through the hot box method (ISO 9869). The results enabled the calculation of the thermal capacity (C_T), thermal lag (φ) and solar factor (F_{s0}) of the specimen, which were compared to the Brazilian Technical Standards NBR 15575-4 and NBR 15220 for Bioclimatic Zone 8. As a result, the specimen showed values of absorptance $\alpha = 0.71$, thermal transmittance $U = 2.47\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, thermal capacity $C_T = 273.43\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}$, thermal lag $\varphi = 6.02\text{h}$ and solar factor $F_{s0} = 6.81\%$, meeting the requirements of the first standard, but failing the second. It is suggested, then, that the bricks be painted lighter tones (to decrease the value of α), or that a layer of lining mortar be incorporated in the external or internal face of the specimen in order to increase its thermal lag (φ). Finally, the tailing studied demonstrated their potential use as a raw material in the manufacture of soil-cement bricks by meeting the Brazilian's specification NBR 8491. It is suggested that new bricks with higher proportions of soil or cement be evaluated.

KEYWORDS: Artisanal mining tailings; Sustainable mining; Mining circular economy; Ecological brick; Tailing characterization.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO, CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	19
1.1. Considerações iniciais	21
1.2. Estrutura do trabalho	22
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS	23
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. Rejeitos de mineração	24
3.2. Atividade garimpeira no Brasil	28
3.3. Depósito de ouro Porteira	32
3.3.1 Resíduos da cianetação	37
3.4. Construção em terra	39
3.4.1 Técnicas de Construção em Terra	45
3.5. Tijolo de solo-cimento	48
3.5.1 Uso de rejeitos na produção de tijolos ecológicos	54
3.5.2 Estabilização dos tijolos de solo-cimento	58
3.6. Caracterização de rejeitos de mineração	62
3.6.1 Amostragem	63
3.6.2 Caracterização física	64
3.6.3 Caracterização química, mineralógica e morfológica	65
a) Técnicas auxiliares	68
3.6.4 Caracterização ambiental	69
3.6.5 Caracterização geotécnica	69
3.6.6 Caracterização dos tijolos de solo-cimento	70
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	73
4.1. Amostragem do rejeito	73
4.2. Caracterização das matérias-primas	76
4.2.1 Caracterização física	77
4.2.2 Caracterização química, mineralógica e morfológica	78
a) Técnicas auxiliares	79
4.2.3 Caracterização ambiental	80
4.2.4 Caracterização geotécnica	80
4.3. Estudo de dosagem	82

4.4. Caracterização dos tijolos	84
4.4.1 Caracterização segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012)	85
4.4.2 Caracterização de durabilidade	86
4.4.3 Caracterização de desempenho térmico	87
a) Ensaio de determinação da absorvância (α)	87
b) Ensaio de determinação da transmitância térmica (U) e análises de erro	90
c) Cálculo de resistência térmica (R_T), capacidade térmica total (C_T), condutividade térmica (k), atraso térmico (φ) e fator solar (FS_o)	92
4.5 Análise de custos	93
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
5.1. Amostragem do rejeito	96
5.2. Caracterização das matérias-primas	97
5.3. Estudos de dosagem	104
5.4. Caracterização dos tijolos	106
5.4.1 Caracterização segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012)	106
5.4.2 Caracterização de durabilidade	108
5.4.3 Caracterização ambiental, química, mineralógica e morfológica	109
5.4.4 Caracterização de desempenho térmico	121
5.5 Análise de custos dos tijolos	125
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	134
CAPÍTULO 7: CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS AO CONHECIMENTO	136
CAPÍTULO 8: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
ANEXO I	151
ANEXO II	154
ANEXO III	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Barragens de rejeito por estado e bem mineral no território brasileiro.....	26
Figura 3.2: Cooperativas minerais no Brasil. Fonte: Adaptado de DNPM (2008).....	30
Figura 3.3: Geologia do depósito Porteira. A) Veio mineralizado e rocha encaixante; B) Veio de quartzo (Qtz) bandado com pirita (Py); C) Veio de quartzo bandado com pirita e calcopirita (Cpy); D) Veio de quartzo com pirita disseminada; E) Au e calcopirita inclusos. F) Au e pirita inclusos. G) Ouro disseminado em sulfetos. H) Ouro livre. Fonte: Adaptado de Oliveira (2017).	33
Figura 3.4: Fluxograma de beneficiamento da MPE estudada.	35
Figura 3.5: Concentrador centrífugo tipo Knelson: vista externa e seção transversal. Fonte: Adaptado de Luz, França e Braga (2018).....	36
Figura 3.6: Exemplos de construção em terra no Brasil	41
Figura 3.7: Exemplos de construção em terra na Ásia, África e Europa.....	42
Figura 3.8: Exemplos de construção em terra na América e na Oceania.	43
Figura 3.9: Diagrama simplificado dos diferentes grupos de sistemas construtivos que utilizam a terra como matéria-prima (Monolítica, Alvenaria, Por Enchimento e Revestimento e Sistemas de ligação).....	47
Figura 3.10: Tijolo maciço de solo-cimento com reentrância, tijolo vazado de solo-cimento e bloco de solo-cimento vazado. Fonte: Adaptado de NBR 8491 (ABNT, 2012).	50
Figura 3.11: Exemplos de prensas de tijolos de solo cimento: a) Cinva-Ram, b) Prensa manual e c) Prensa hidráulica. Fonte: a) Rubiano e Caicedo (2008), b) Alibaba (2020), c) Alibaba (2020).	53
Figura 3.12: Sequência ilustrativa para a confecção e uso dos tijolos de solo-cimento. Fonte: Adaptado de Sémon e Gauzin-Muller (2015).....	53
Figura 3.13: Detalhes da alvenaria com tijolos de solo-cimento sem argamassa de assentamento. Fonte: Adaptado de ANITECO (2020).....	54
Figura 3.14: Representação diagramática da zona de transição e da matriz cimentícia da pasta de cimento no concreto. Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).....	61
Figura 3.15: Efeito pepita.	64
Figura 3.16: Zonas bioclimáticas brasileiras. Fonte: Adaptado de CONSTRUROHR (2020).....	72
Figura 4.1: Local de coleta das matérias-primas para a fabricação de tijolos. Fonte: A Figura foi construída através de imagens do Google Earth e do Google (< https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brazil_Mato_Grosso_Cuiaba_location_map.svg >).	74
Figura 4.2: a) Barragem de rejeito b) Remoção dos rejeitos da barragem para alimentação da lixiviação c) Carregamento e transporte do rejeito d) Material para a lixiviação e) Material cianetado f) Material estudado - rejeito da cianetação.	75
Figura 4.3: Concentrador centrífugo Knelson.	79

Figura 4.4: Extrator de corpo de prova à esquerda e corpo de prova desmoldado a direita.	83
Figura 4.5: Prensa para o teste de resistência à compressão uniaxial (esquerda) e corpo de prova cilíndrico sendo prensado (direita).	84
Figura 4.6: a) Prensa manual PERMAQ; b) moldagem do tijolo; c) tijolo moldado; d) tijolos para análise dimensional; e) ensaio de absorção de água; f) ensaio de resistência à compressão.....	86
Figura 4.7: Construção do corpo de prova – parede de tijolos tipo solo-cimento.	87
Figura 4.8: Utilização do espectrômetro ALTA II para medição da refletância do corpo de prova.....	88
Figura 4.9: Representação esquemática da câmara térmica: 1- Câmara ambiente; 2- Câmara quente; 3- Corpo de prova; 4- Ventiladores; 5- Lâmpada de infravermelho; 6- Chicanas, 7-Fotografia interna, 8- Fotografia externa.. Fonte: Adaptado de Cordeiro et al. (2020).....	90
Figura 4.10: corpo de prova com fluxímetro e sensores de temperatura fixados, (b) câmara ambiental montada e (c) foto do corpo de prova obtida por meio de termo visor FLIR após término do ensaio.	91
Figura 5.1: Imagens do rejeito por registro fotográfico e microscopia ótica.....	97
Figura 5.2: Análise granulométrica do rejeito.	99
Figura 5.3: Análise MEV/EDS do rejeito.....	103
Figura 5.4: Análise MEV/EDS do solo.	103
Figura 5.5: Limites de Atterberg para as misturas 1:10:0, 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5 e para o solo.	104
Figura 5.6: Estudo de dosagem/ Ensaio de compactação.....	105
Figura 5.7: Caracterização dos tijolos segundo valores de resistência à compressão e absorção de água após 28 dias de cura.	107
Figura 5.8: Resistência à compressão dos compostos de solo-cimento após 7 dias de cura.	108
Figura 5.9: Análise química, mineralógica e morfológica dos tijolos de mistura 1:5:5.	114
Figura 5.10: Curvas de análise térmica para o rejeito.....	116
Figura 5.11: Curvas de análise térmica para o solo.	116
Figura 5.12: Curvas de análise térmica TGA para o rejeito, solo e tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5.....	117
Figura 5.13: Curvas de análise térmica DTA para o rejeito, solo e tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5.....	118
Figura 5.14: Espectros observados através da análise de FTIR do rejeito, solo e tijolos de traço 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5.....	120
Figura 5.15: Temperatura interna e externa da parede e transmitância térmica obtidas durante o ensaio.	122
Figura 5.16: Fluxo de caixa acumulado da produção de tijolos de solo-cimento.....	129
Figura 5.17: Fluxograma da metodologia adotada e dos resultados obtidos.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação das barragens de rejeitos brasileiras	25
Tabela 3.2: Reservas Garimpeiras Brasileiras de Ouro	31
Tabela 3.3: Emissão de CO ₂ em alvenaria em terra e industrial.....	44
Tabela 3.4: Vantagens e desvantagens da construção em terra	45
Tabela 3.5: Análise dimensional de tijolos tipo solo-cimento.....	49
Tabela 3.6: Principais exigências para a fabricação de tijolos de solo-cimento.....	51
Tabela 3.7: Abreviação dos óxidos do clínquer.....	58
Tabela 4.1: Misturas ou traços volumétricos avaliados para a produção de tijolos tipo solo-cimento.....	83
Tabela 4.2: Metodologia adotada.....	95
Tabela 5.1: Distribuição granulométrica do rejeito	98
Tabela 5.2: Resultados da análise de distribuição granulométrica segundo a NBR 7180 (ABNT, 2018).....	100
Tabela 5.3: Fases minerais majoritárias encontradas nas matérias-primas por DRX...	101
Tabela 5.4: Caracterização química por FRX.....	102
Tabela 5.5: Classificação do solo segundo a massa específica seca após compactação	105
Tabela 5.6: Caracterização dos tijolos de solo-cimento segundo a NBR 8491	106
Tabela 5.7: Ensaio de durabilidade dos tijolos de solo-cimento.....	109
Tabela 5.8: Caracterização ambiental- parâmetros aprovados para o rejeito e traços 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5	110
Tabela 5.9: Caracterização ambiental- parâmetros reprovados para o rejeito e traços 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5	111
Tabela 5.10: Dados da análise termogravimétrica do rejeito, solo e tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5	118
Tabela 5.11: Principais picos dos espectros de FTIR e seus respectivos grupos funcionais	120
Tabela 5.12: Refletâncias de referência obtidas para uma folha de papel branco comum e para o corpo de prova em estudo	121
Tabela 5.13: Parâmetros térmicos avaliados para as zonas bioclimáticas brasileiras segundo a NBR 15575-4 (ABNT, 2013)	123
Tabela 5.14: Parâmetros térmicos avaliados para as zonas bioclimáticas brasileiras segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2013)	124
Tabela 5.15: Fluxo de caixa para a produção de tijolos tipo solo-cimento	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Normativas brasileiras aplicáveis aos tijolos e blocos de solo-cimento	52
Quadro 3.2: Exemplos de estudos recentes que empregam rejeitos de mineração na produção de tijolos ecológicos.....	57
Quadro 3.3: Tipos de cimento Portland normatizados no Brasil	60
Quadro 3.4: Resistência mecânica dos cimentos Portland em função do tempo.....	62
Quadro 5.1: Parâmetros utilizados para a amostragem do rejeito	97
Quadro 5.2: Levantamento de custos para a fabricação de tijolos tipo solo-cimento ..	126

LISTA DE NOTAÇÕES

- A – Absorção de água
- AAF – *Fire Assay*
- AAS - Espectrometria de Absorção Atômica
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- a.C – Antes de Cristo
- al* – Teor adotado do mineral de interesse
- ANITECO – Associação Nacional da Indústria do Tijolo Ecológico
- ANM – Agência Nacional de Mineração
- ASE – Área Superficial Específica
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- BA – Bahia
- BET - Brunauer, Emmett e Teller
- BJH - Barret, Joyner e Hallenda
- BTC – Blocos de terra comprimida
- c* – Comprimento
- c* – Fator de constituição mineralógica
- C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
- C-A-S-H – Aluminossilicato de cálcio hidratado
- CADE - Conselho Administrativo de Defesa Econômica
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
- CEB – *Compressed Earth Block*
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
- CNPJ – Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica
- CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão
- COD - *Crystallography Open Database*
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COOGAVEP - Cooperativa dos Garimpeiros de Alta Floresta
- CP – Corpo de Prova

CPII-Z – Cimento Portland Composto com adição de pozolanas
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
 C_T – Capacidade térmica
 d – Distância mínima entre os dois furos do tijolo de solo-cimento
 d_{95} - Diâmetro no qual 5% das partículas ficam retidas
DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX – Difração de Raios-X
DTA - Análise Térmica Diferencial
 e - Espessura
EDS - Espectrometria de Energia Dispersiva
 f – Fator de forma
FGV – Fundação Getúlio Vargas
FRX – Fluorescência de Raios –X
 F_{so} – Fator solar
 ft – Resistência à compressão
FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
 g – Fator de granulometria
 h - Altura
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICP-OES -Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado
IHL – Fórmula de Gy
IP –Índice de Plasticidade
ISO - Organização Internacional de Padronização
 l –Fator de liberação
 l – Largura
LL – Limite de Liquidez
LO – Licença de Operação
LP – Limite de Plasticidade
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MG – Minas Gerais
MinPenv - Processamento Mineral e Meio Ambiente
MME - Ministério de Minas e Energia

MPE - Mineração em Pequena Escala

MS_g - Massa mínima de amostra representativa em função da distribuição granulométrica

MS_t - Massa mínima de amostra representativa em função do teor do mineral-minério

MT – Mato Grosso

NBR – Norma técnica Brasileira

OCB - Organização das Cooperativas Brasileiras

ONUBR - Nações Unidas do Brasil

os - *oversize*

PA – Pará

PAAF - Província Aurífera de Alta Floresta

p_d - Massa específica seca máxima

p_m – Densidade do constituinte de interesse

PIB – Produto Interno Bruto

PLG - Permissão de lavra garimpeira

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PPGEM – Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

ppm – Parte por milhão

r - Reentrância

R_{antigo} – Rejeito proveniente do antigo processo de beneficiamento

RASBM - Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração

RCC – Resíduos de Construção Civil

R_{novo} – Rejeito proveniente do novo processo de beneficiamento

RO – Rondônia

ROM – *Run of mine*

R_T – Resistência térmica total

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SELIC - Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente

S_{FSE} – Máximo desvio padrão do erro fundamental de amostragem

SP – São Paulo

SMEWW - *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

TGA - Análise Termogravimétrica

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

T_{se} - Temperatura superficial média externa média externa

T_{si} - Temperatura superficial média externa média interna

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

us - *undersize*

VPL - Valor Presente Líquido

Z – Zona Bioclimática Brasileira

α – Absortância

k - condutividade térmica

φ – Atraso térmico

ρ - Refletância

λ – Comprimento de onda

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO, CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Um dos grandes desafios da sociedade moderna, que dispõe de uma ampla variedade de bens tecnológicos, alimentícios, acesso à cultura, lazer, entre outros, é o alto consumo de matérias-primas naturais. As Nações Unidas do Brasil, ONUBR (2019), estimam que se em 2050 for mantido o mesmo ritmo de consumo que em 2018, serão necessários, para este ano, 60% a mais de alimentos produzidos, 50% a mais de energia e 40% a mais de água potável para atender uma população que deve ultrapassar os 9 bilhões de habitantes.

Para atender as necessidades futuras faz-se necessário o melhor aproveitamento dos nossos recursos naturais em diversos setores, uma vez que a sociedade funciona de forma interligada; nenhum ramo industrial está completamente isolado de outro.

Sobre esta inter-relação, a mineração é uma área expressiva no PIB¹ brasileiro. O relatório da Agência Nacional de Mineração, ANM (2019), mostrou que no ano de 2018 o setor produziu cerca de 88 bilhões de reais, dos quais 77% correspondem à produção de minerais metálicos, principalmente de ferro, ouro, alumínio, cobre, estanho, manganês, nióbio e níquel. Desse montante, o ouro é o segundo bem metálico mais comercializado no país e o principal extraído no estado de Mato Grosso.

Ainda que seja de extrema importância para a economia, responsável pela extração de materiais necessários para outros setores, a mineração é alvo de constante debate devido ao fato de explorar recursos naturais não renováveis. Além disso, com a elevada produção, também são geradas quantidades expressivas de rejeitos. Atenção especial para as jazidas cujo mineral-minério está em teores muito baixos, da ordem de ppm², como na extração de ouro, por exemplo, onde grandes quantidades de rejeitos são geradas para a concentração de pequenas quantidades do metal. Um estudo feito por Jones e Boger (2012) aponta que a indústria mineral é a maior produtora mundial de descartes, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas/ano, dos quais 14 bilhões são rejeitos constituídos majoritariamente por partículas finas, menores que 150µm. Gomes (2017) indica em levantamento realizado, que apenas no ano de 2014, mais de 110 milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro foram estocadas em barragens de rejeitos, apenas no estado de Minas Gerais.

Estes rejeitos são depositados em barragens de contenção, que em geral, são grandes estruturas que armazenam água e sólidos finos, ou em pilhas de deposição em pátios de estocagem e são de responsabilidade da mineradora, mesmo após o encerramento das atividades da empresa. São também os principais responsáveis pelos impactos ambientais da mineração. Ainda que nem toda mineradora invista no reprocessamento dos seus rejeitos, é notório o crescente interesse do setor em buscar outras formas de se aproveitar este material.

Essa tendência vai de encontro ao que preconiza a economia circular, cujo objetivo é potencializar o uso de diversos materiais. Enquanto à tradicional economia linear extrai, produz, usa e descarta, a circular propõe resgatá-los e mantê-los na cadeia produtiva pelo

¹ PIB = produto interno bruto.

² ppm = parte por milhão. No caso, 1 parte de ouro para 1 milhão de partes de rejeito.

máximo tempo possível, ainda que em outro setor industrial (ZHANG, 2013; EDRAKI *et al.*, 2014; TAYEBI-KHROMANI *et al.*, 2019).

Kinnunen e Kaksonen (2019) enfatizam que o uso de resíduos de mineração, num geral, como fonte de matéria-prima secundária, pode ser uma solução para o fornecimento limitado de metais. Entretanto, a economia circular na mineração, a nível mundial, ainda carece de estudos que orientem as possíveis formas de valorização de rejeitos, bem como avanços tecnológicos, e incentivos governamentais e ambientais.

A mineração é o setor industrial que extrai os recursos minerais, ao passo que a construção civil é um dos maiores consumidores desses bens. Domingues (2015) estima que 50% de todos os recursos minerais mundiais são destinados para a construção civil; e o consumo elevado desses recursos também gera fortes impactos ambientais. Em adição, segundo a ONU (2015), a construção civil é responsável por cerca de 30% das emissões de gases de efeito estufa e 40% do consumo mundial de energia.

No momento atual, clemente por empreendimentos sustentáveis, observa-se o maior uso de técnicas de construção mais adaptáveis ao ambiente, com tecnologias consideradas menos nocivas ao *habitat* e que empregam eco materiais.

A bioconstrução ganha força por contribuir enquanto solução para o futuro das construções a nível mundial. Os meios convencionais com uso de materiais industrializados, da forma como são utilizados hoje, não atenderão as necessidades humanas em longo prazo pela excessiva poluição e demanda de bens naturais. Os planejamentos urbanos do futuro serão projetados baseados na sustentabilidade, respeitando as características físicas, biológicas e ecológicas daquele espaço, usufruindo dos recursos que ele dispõe e cooperando com sistemas vizinhos visando às deficiências de cada um (ZHANG *et al.*, 2017; GONZÁLEZ-LÓPEZ *et al.*, 2018).

Neste contexto, visando adotar práticas que incorporem a bioconstrução e a economia circular, estudos que envolvem a fabricação de tijolos tipo solo-cimento, também conhecidos como tijolos ecológicos, utilizando materiais secundários, como rejeitos de mineração, vem sendo conduzidos. A NBR 8491 (ABNT, 2012) define o tijolo de solo-cimento como um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, e água, fabricado com a utilização de prensa manual ou hidráulica sem o processo de cozimento. Alguns autores discorrem sobre as vantagens da bioconstrução e se referem a estes tijolos como ecológicos pela sua baixa emissão de CO₂ e subprodutos, por apresentar fácil manuseio, e não exigir mão de obra especializada (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012; DOMINGUES, 2015; ZHANG *et al.*, 2017).

Ainda que pesquisas que abordem a incorporação de rejeitos de mineração na indústria civil sejam cada vez mais frequentes, poucas utilizam rejeitos de mineração de ouro porque o seu processamento envolve o uso de substâncias nocivas, tais como mercúrio e cianeto, a depender da geologia do minério e do empreendimento.

No Brasil, a norma técnica NBR 8491 (ABNT, 2012) estabelece que dois parâmetros sejam considerados na avaliação de tijolos de solo-cimento, resistência à compressão e absorção de água. Contudo, ademais desses indicadores, conhecer as características dos rejeitos é necessário, pois variações da composição química, mineralógica,

granulométrica, assim como características de periculosidade são intrínsecos a cada rejeito e podem produzir tijolos com aspectos distintos (ZHANG, 2013).

Em adição, cada vez mais se espera que os materiais de construção desempenhem múltiplas funções, sejam duráveis e sustentáveis. Para Fayçal *et al.* (2016), Mansour *et al.* (2017), e Zhang *et al.* (2017), a caracterização de tijolos de solo-cimento, ademais de satisfazer os requisitos estruturais, também deve satisfazer os parâmetros de desempenho térmicos, uma vez que estes estão relacionados aos requisitos de habitabilidade das edificações.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é avaliar o uso de rejeito fino de uma mineração em pequena escala de ouro no estado de Mato Grosso como matéria-prima principal na fabricação de tijolos tipo solo-cimento e caracterizar os produtos segundo as normativas brasileiras aplicadas para esta técnica de alvenaria, tendo em vista que esse rejeito é considerado um passivo ambiental.

1.1. Considerações iniciais

A presente tese teve como inspiração inicial duas dissertações de mestrado. A primeira, citada como Gomes (2017), escrita pela mesma autora deste texto, defendida no programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas (PPGEM) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) de título “Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração”, em que foram consideradas formas de se reutilizar os descartes da mineração. Já a segunda, citada como Cordeiro (2019), foi defendida no programa de pós-graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), pela autora Carol Cardoso Moura Cordeiro de título “Caracterização de um solo tropical visando sua utilização como material para pequenas construções em terra compactada”. A autora mostrou os excelentes resultados de uma litologia específica de solo tropical em Mato Grosso para a construção de paredes.

O estado de Mato Grosso possui extensa atividade mineral, sobretudo, garimpeira, para a exploração de ouro, diamantes e agregados. Atividades essas que geram expressivas quantidades de rejeito, sem destinação industrial, que representam um passivo ambiental. Dessa forma, as autoras fizeram estudo preliminar para discutir a mescla de solo e rejeitos de mineração para outros fins do ramo civil.

O termo “terra”, presente neste trabalho, pode ser entendido como solo, uma vez que a parte orgânica do primeiro não será considerada nos testes realizados. Holtz e Kovacs (2010) definem solo como um conjunto de partículas sólidas que englobam vazios que podem estar preenchidos com água e/ou ar de formas e tamanhos variados. Essa massa de solo pode ser caracterizada segundo as suas propriedades mecânicas; entre elas, ângulo de atrito interno, resistência ao cisalhamento e coesão. Portanto, solo e terra serão frequentemente citados aqui como sinônimos.

As construções feitas com este material serão referidas como vernáculas. Este termo pode ser entendido como construção que emprega materiais e recursos do próprio ambiente em que a edificação é realizada. A construção intuitiva, sem conhecimento teórico, cujos *design* e técnica dependem do contexto e da tradição local, se enquadra neste conceito. Entretanto, desde o século XIX, profissionais de arquitetura e edificações têm se

especializado na construção em terra de forma crescente, desempenhando assim, um papel cada vez mais marcante na nossa sociedade (MINKE, 2006).

Vale também definir rocha, uma vez que aqui será discutida a composição solo e rejeito (parte não viável economicamente do beneficiamento mineral) para a fabricação de tijolo de solo-cimento. Brady e Brown (2013) conceituam rocha como material sólido, consolidado em forma de fragmentos ou grandes massas que são formados naturalmente por um único ou conjunto de minerais; sendo mineral um composto inorgânico, homogêneo, sólido, com composição química bem definida e arranjo atômico ordenado.

Assim, ainda que a diferença entre os termos rocha e solo não seja realizada de forma rigorosa, as principais diferenças que distinguem um do outro são a coesão interna e a resistência à tração. A primeira propriedade é a força resultante das ligações entre os átomos e, conseqüentemente, dos elétrons em órbitas de valência. Já a resistência à tração é medida pela quantidade de força aplicada para quebrar um corpo por estiramento. As rochas possuem estes dois parâmetros bem mais elevados que os solos. É possível dizer então que as rochas são, via de regra, materiais menos deformáveis e mais resistentes, e que o solo (ou terra aqui trabalhada com a extração da matéria orgânica) é resultado da degradação de rochas por intemperismo físico, químico e biológico agravados pela bioclimática do *habitat*, formando uma camada finita por cima dos corpos rochosos. (BRADY e BROWN, 2013; HOLTZ e KOVACS, 2010).

O presente rejeito estudado passou pelo processamento mineral incluindo sucessivas fragmentações e etapas de concentração gravimétrica. Dessa forma, ainda que, originalmente, a lavra tenha sido realizada em rocha magmática com veios de quartzo mineralizado, o beneficiamento mineral alterou a granulometria, a coesão interna e a resistência à tração do material, por isso a caracterização geotécnica será feita seguindo normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que trata da caracterização de solos.

1.2. Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta ensaios de caracterização de rejeito de mineração em pequena escala de ouro e de solo, ambos coletados no município de Peixoto de Azevedo, no estado de Mato Grosso, na Zona Bioclimática Brasileira 8 (Z8), e avalia proporções destas duas matérias-primas, água e cimento para a produção de tijolos tipo solo-cimento. A pesquisa engloba também a caracterização dos tijolos fabricados. Objetiva-se avaliar se o rejeito de mineração pode ser aproveitado pela indústria civil através dessa técnica de alvenaria.

A presente tese foi estruturada como recomenda o PPGEM, onde o capítulo 1 contextualizou a importância de se aproveitar os rejeitos de mineração com base nos preceitos da economia circular; o capítulo 2 define o objetivo geral e os específicos pretendidos; já o capítulo 3 traz conceitos e estudos relevantes para a compreensão de toda a pesquisa através de revisão bibliográfica. No capítulo 4 está descrita a metodologia adotada, enquanto o capítulo 5 apresenta e discute os resultados encontrados. Sobre a discussão realizada, o capítulo 6 aponta as conclusões gerais e o capítulo 7 discorre sobre as contribuições científicas originais ao conhecimento. Por fim, o capítulo 8 faz sugestões para trabalhos futuros. Ao final do trabalho estão listadas as referências bibliográficas utilizadas e os anexos com informações complementares ao texto.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

O objetivo global deste estudo foi avaliar o uso de rejeito de mineração de ouro, em pequena escala, como matéria-prima principal na produção de tijolos tipo solo-cimento. Os objetivos específicos indicados a seguir estão associados ao conhecimento/caracterização das matérias-primas utilizadas (rejeito e solo), a avaliação de misturas para a produção de tijolos, e a caracterização dos tijolos fabricados segundo orientações técnicas da ABNT. Assim, os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar física, química, ambiental e geotecnicamente as matérias-primas para a fabricação de tijolo de solo-cimento (rejeito e solo):
 - a) Caracterização física: determinação da massa específica, da área superficial específica e da distribuição granulométrica;
 - b) Caracterização química: identificação das fases minerais majoritárias e elementos químicos presentes;
 - c) Caracterização ambiental: determinação da proporção de elementos nocivos no lixiviado e solubilizado das matérias-primas.

- Avaliar as misturas/proporções compostas por cimento, rejeito e solo:
 - a) Caracterização geotécnica: determinação dos Limites de Consistência.
 - b) Avaliação da densidade aparente seca máxima e do teor de umidade ótimo correspondente à energia normal de compactação das misturas.

- Fabricar tijolos de solo-cimento em diferentes dosagens.

- Caracterizar física, química, ambiental e termicamente os tijolos de solo-cimento produzidos:
 - a) Caracterização física: determinação da resistência à compressão simples, da absorção de água, e da durabilidade dos tijolos;
 - b) Caracterização ambiental: determinação da proporção de elementos nocivos no lixiviado e solubilizado dos tijolos;
 - c) Caracterização química e mineralógica: análise de elementos químicos, minerais e morfologias presentes nos tijolos;
 - d) Caracterização térmica: avaliação do desempenho térmico dos tijolos produzidos.

- Avaliar os custos da produção dos tijolos de solo-cimento feitos com rejeito de mineração.

CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em tópicos com o intuito de apresentar a problemática dos rejeitos gerados pela indústria da mineração, com trabalhos envolvendo o aproveitamento de rejeitos, a atividade garimpeira no Brasil, características da geologia e do beneficiamento do empreendimento que forneceu a amostra estudada, e características específicas dos rejeitos gerados pela mineração de ouro. Após, abordou-se a construção em terra para melhor contextualizar o uso de tijolos de solo-cimento, as normativas que orientam sobre essa técnica no Brasil, sua estabilização e o uso de rejeito de mineração para a fabricação desses tijolos. Por último, discorreu-se sobre métodos de caracterização de rejeito de mineração de ouro e dos tijolos de solo-cimento fabricados com essa matéria-prima alternativa.

3.1. Rejeitos de mineração

A melhor maneira de se preservar um recurso não renovável é o seu consumo racional. No entanto, o tamanho da população e os padrões atuais de vida tornam a redução desse consumo mineral algo quase utópico. Com a elevada produção de minério para atender a demanda de bens minerais da sociedade como um todo, também são geradas expressivas quantidades de resíduos de mineração.

Sobre estes, pode-se considerar os estéreis e os rejeitos. O primeiro termo se refere a parte do decapeamento de uma jazida, na fase de lavra, que não tem valor econômico e por isso é mantido em pilhas de deposição de estéreis, que em muitas minas é compactado e forma taludes. Após o decapeamento, o minério é lavrado, direcionado para a planta de beneficiamento, onde a etapa de concentração separa o produto (mineral-minério) que será comercializado, do rejeito (ganga) que não tem valor econômico naquela ocasião.

Os rejeitos são geralmente partículas finas ($<150\mu\text{m}$) que são direcionadas para barragens de rejeitos - estruturas que contêm esses descartes em forma de polpa. Com o passar dos anos, as barragens têm ganhado destaque no cenário brasileiro, com a criação de leis, portarias e resoluções que visam à regulação e fiscalização destas construções. Dentre elas, destaca-se a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que estabelece que o empreendedor seja o responsável legal pela segurança da barragem, que deve garantir as inspeções previstas por lei, as revisões periódicas, e a organização da documentação referente a mesma. As barragens cadastradas no PNSB são classificadas de acordo com dois parâmetros em níveis alto, médio ou baixo.

Sobre estes, a ANM (2020) explica que o parâmetro risco associado envolve características técnicas e aspectos que influenciam a probabilidade de acidente, como estado de conservação e plano de segurança de barragens. Já o dano potencial associado diz respeito aos impactos ambientais, econômicos e sociais que a ruptura, vazamento ou infiltração no solo da estrutura podem vir a acarretar independentemente da sua probabilidade de ocorrência. Para que uma barragem seja cadastrada na PNSB ela precisa se enquadrar em um dos seguintes critérios: altura ($>15\text{m}$), volume (>3 milhões m^3), resíduo (perigoso) e dano potencial associado (médio ou alto). Assim, o pior cenário possível é o de uma barragem que apresenta risco e dano potencial associados altos, sendo classificada como barragem nível A. De modo análogo, o melhor cenário possível é

representado por uma estrutura que apresenta risco e dano potencial associados baixos, o que a classifica como barragem nível E, como ilustra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação das barragens de rejeitos brasileiras

Risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	B	C	D
Baixo	C	D	E

Fonte: Adaptada de ANM (2020).

Duarte (2008) observa que, assim como no Brasil, a maioria dos países possui legislação vigente para a disposição de resíduos minerais e barragens de rejeitos. Contudo, não são raros os acidentes envolvendo tais estruturas, e, juntamente com eles, os prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Mesmo com as leis e tecnologias disponíveis, algumas barragens são construídas com critérios falhos de projeto, operação ou manutenção. Apesar de legislação específica, são poucos os países que têm o real controle do número e condição das barragens de contenção de rejeitos em seus territórios. Uma das primeiras ações para minimizar o risco de acidentes seria uma eficaz gestão dessas estruturas, um inventário completo que especifica as dimensões dos projetos (altura, volume, comprimento da crista, massa depositada, entre outros), suas características de operação e monitoramento. Com os dados devidamente coletados e organizados, deve-se classificar a barragem segundo seu parâmetro de risco, definindo assim o seu nível e o tipo de inspeção que deverá ser realizada.

Lozano (2006) enfatiza que o custeamento de acidentes, que envolve, dentre outros fatores, danos a propriedades, estudos e relatórios, indenizações e taxas legais, tempo da equipe e perda de remuneração, é notoriamente mais elevado que o de prevenção, que engloba estudos preliminares, engenharia de projeto, supervisão de construção, operação e serviços de manutenção. O autor acredita que a definição de um risco aceitável para cada local não é tarefa fácil, envolve o trabalho de uma série de profissionais. Quanto maior o nível de segurança aferido, maior será o capital injetado para estudos de prevenção e controle de riscos. Garantir que a legislação vigente seja efetivamente aplicada é de extrema importância para minimizar o risco de rompimentos de barragens de rejeitos.

A Figura 3.1 foi construída para este trabalho graças a dados disponibilizados pela Agência Nacional de Mineração, ANM (2020) com o intuito de estimar a quantidade de barragens de rejeitos no território brasileiro por estado e minério beneficiado. Nela é possível observar que o Brasil dispõe de mais de 720 barragens de rejeitos, das quais cerca de 53% estão inseridas no PNSB. Minas Gerais (MG), São Paulo (SP), Pará (PA),

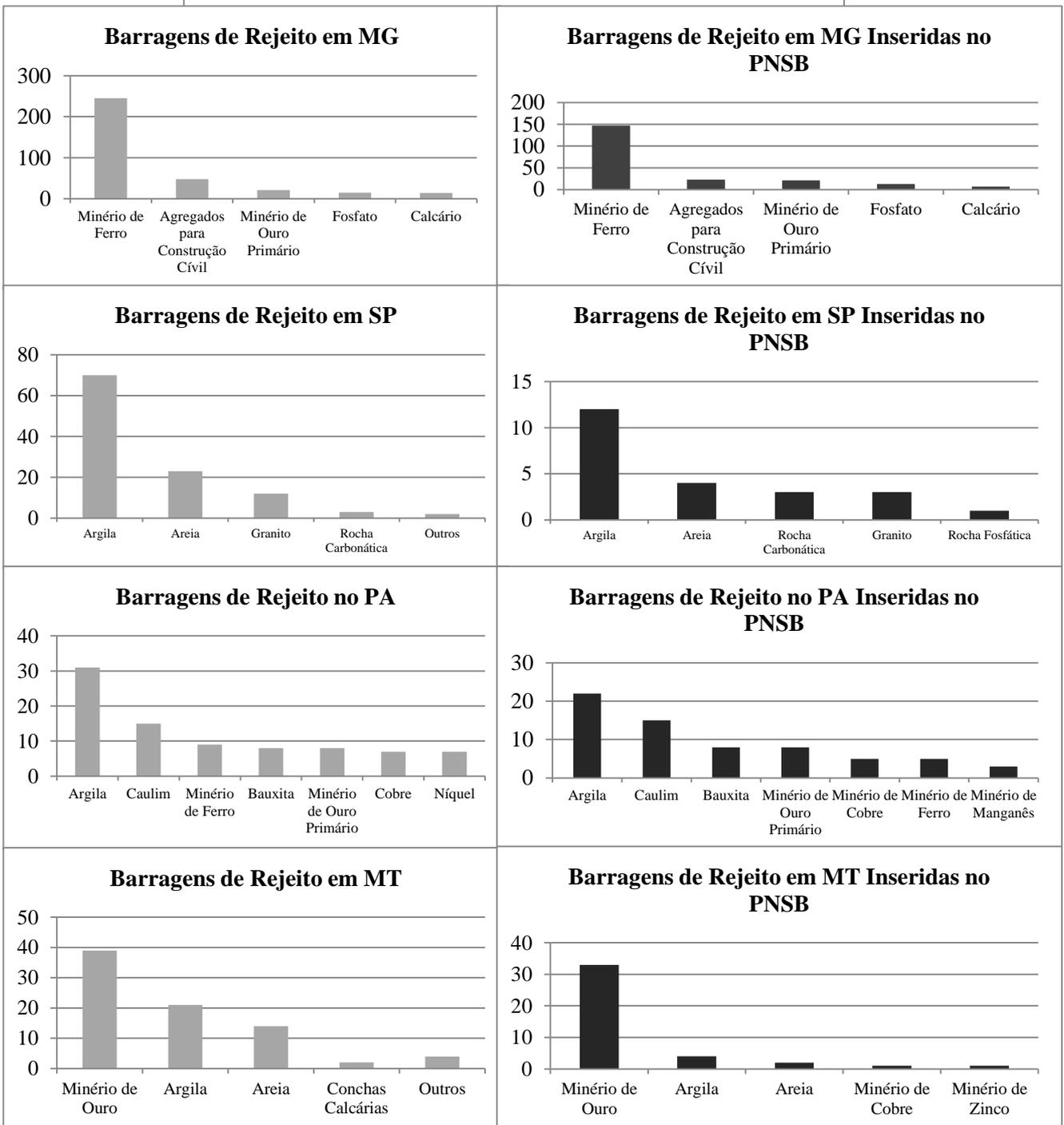
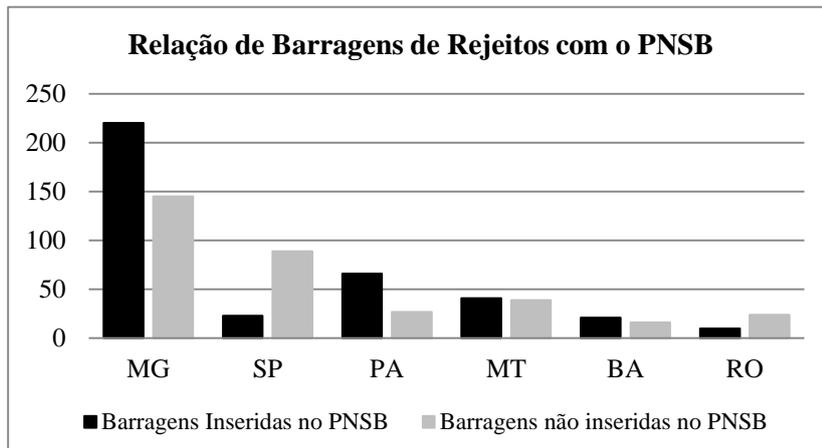


Figura 3.1: Barragens de rejeito por estado e bem mineral no território brasileiro.

Mato Grosso (MT), Bahia (BA) e Rondônia (RO) são, nessa ordem, os que mais possuem estas estruturas.

Minas Gerais é o estado brasileiro com valores mais expressivos de mineração, visto que das 343 barragens listadas, 62% estão classificadas no PNSB. O segundo colocado, SP conta com 110 barragens de rejeito, das quais 21% estão no PNSB. Já o Pará, apesar de listar apenas 85 estruturas, tem 78% delas classificadas no Plano Nacional de Segurança de Barragem, o que indica o alto volume das barragens nesse estado. MT, BA, e RO, possuem 51, 70 e 35% das suas barragens no PNSB respectivamente. A Figura 3.1 também traz as barragens de rejeito por estado brasileiro e por bem mineral; os gráficos a esquerda contam com todas as barragens listadas na ANM, e os gráficos a direita, todas as que foram classificadas na PNSB.

Sobre Minas Gerais, o estado contém quase 150 barragens de minério de ferro inseridas no PNSB. MG também dispõe de barragens de agregados para construção civil (brita, areia e argila), minério de ouro, fosfato e calcário. Os agregados para construção civil são os responsáveis pelo maior número de barragens de rejeito em SP. As do PA também são majoritariamente de argila, seguidas por caulim, bauxita, ouro, cobre, ferro e manganês. Já em MT, as principais barragens são de ouro, seguidas por material para a construção civil, cobre e zinco. Um dado interessante sobre as barragens no estado de Mato Grosso é que, a maioria (70%) está cadastrada no PNSB não pelas dimensões da estrutura de contenção (altura >15m ou capacidade > 3 milhões de m³), mas sim pelo tipo de resíduo, perigoso, característico da mineração de ouro (ANM, 2020).

Os próprios órgãos responsáveis pela classificação e fiscalização das barragens de rejeito no Brasil reconhecem que, apesar do esforço empenhado, não são capazes de identificar 100% dessas estruturas devido principalmente ao nosso vasto território, ao número deficiente de profissionais responsáveis, a alta demanda de trabalho, e a grande quantidade não só de minas, mas também de garimpos legalizados e clandestinos (ANM, 2020).

A problemática dos resíduos de mineração, principalmente aqueles dispostos em barragens de rejeitos, vem sendo cada vez mais debatida, e, alternativas, para o seu reaproveitamento, cada vez mais estudadas desde a ruptura da barragem de Fundão, da Samarco (2015) e enfatizadas pela tragédia em Brumadinho, em mina da Vale (2019). Após esta última ruptura, a ANM (2020) publicou o primeiro Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração (RASBM), elaborado no âmbito da PNSB, cujos objetivos são alcançar um maior controle do número de barragens no país, bem como melhorias das suas condições de segurança.

Assim como defendido no RASBM pela ANM (2020), a presente tese considera a reutilização de finos oriundos de barragens uma forma de valorização dos recursos naturais não renováveis. A investigação de como esse aproveitamento será realizado dá-se pela caracterização do rejeito que norteará os processos subsequentes.

3.2. Atividade garimpeira no Brasil

Se o real controle das barragens de rejeitos de grandes empresas mineradoras já é considerado árduo e impreciso, o cadastro destas contenções providas da mineração em pequena escala (MPE) apresenta um cenário ainda pior.

A mineração em pequena escala tem grande importância econômica e social no Brasil desde o século XVII. Ainda que a sua ocupação inicial esteja, principalmente, relacionada à comercialização de cana de açúcar e pau-brasil, a grande responsável pela interiorização do Brasil foi a busca por metais preciosos, dentre os quais se destacam o ouro e o diamante. A descoberta destes minerais provocou uma forte corrente migratória pelo interior do país originando, assim, novas fronteiras de municípios e estados (BARRETO, 2001).

O termo “mineração em pequena escala” difere do que hoje chamamos mineração propriamente dita por critérios que envolvem o número de empregados, produção diária, capital e investimento para o início do empreendimento, e características da jazida. E este termo, por sua vez, pode ser dividido em pequena empresa de mineração e garimpo (BARRETO, 2001).

O Ministério de Minas e Energia MME (2018) divulgou um relatório que objetiva traçar um diagnóstico socioeconômico e ambiental da mineração em pequena escala no Brasil, onde define a MPE como aquela empresa ou cooperativa de mineração que produz até um milhão de toneladas de minério (ROM³) por ano, incluindo as micro, pequena, média e mineração artesanal (garimpo), possui até 499 trabalhadores, e fatura anualmente até R\$ 300 milhões.

A nível mundial, para Veiga e Baker (2004), a MPE emprega aproximadamente 50 milhões de pessoas em todo o globo e produz cerca de 20% dos recursos minerais não combustíveis. Teschner *et al.* (2017) acrescentam que a MPE é importante por fornecer uma fonte de renda em países em desenvolvimento que sofrem com altas taxas de subemprego. Contudo, os benefícios econômicos dessa atividade são acompanhados por prejuízos ambientais, problemas de saúde e segurança ocupacional, e, em alguns casos, de violações aos direitos humanos. Vale comentar que os termos “mineração artesanal” e “garimpo” são sinônimos. Ainda que o primeiro seja comum em trabalhos internacionais, e cada vez mais utilizado no país, “garimpo” ainda é a expressão mais utilizada no Brasil.

A ANM pode conceder a permissão de lavra garimpeira para qualquer brasileiro como pessoa física, cooperativa de garimpeiros ou firma individual, desde que este protocole um relatório que contenha os seus dados de identificação, a designação das substâncias que serão pesquisadas, a localização e a área do local pretendido com os seus georreferências e memorial descritivo, anotação de responsabilidade técnica, e pagamento de taxas. O requerimento de lavra garimpeira pode ser negado caso a área já tenha sido previamente concedida, coincida com áreas protegidas ambientalmente ou não cumpra algum requisito obrigatório⁴.

³ ROM = *run of mine*. Termo designado para o minério bruto que alimenta a planta de beneficiamento.

⁴ Portal da outorga disponível em:

<http://outorga.dnppm.gov.br/_layouts/mobile/mblwiki.aspx?Url=%2FSitePages%2FRegimes%20PLG%20Easpx.> Acesso em janeiro de 2021.

Segundo o Serviço Geológico do Brasil, CPRM (2016), a lavra garimpeira diz respeito à extração de substâncias minerais garimpáveis com aproveitamento imediato do jazimento mineral que deve ser caracterizado pela substância mineral (que não exige beneficiamento de tecnologia avançada), pelo seu pequeno volume e/ou distribuição irregular do minério, o que não justifica altos investimentos e viabiliza o garimpo. Dentre os possíveis minerais garimpáveis destacam-se o ouro, gemas em geral, volframita, scheelita, quartzo, espodumênio, lepidolita e qualquer outra substância, a critério da ANM, que pode conceder a permissão de lavra pelo prazo de até cinco anos, sempre renovável, por mais cinco, não excedendo a área máxima de 50 hectares, exceto as que forem outorgadas por cooperativa de garimpeiros.

Vale ressaltar que a área para permissão de lavra garimpeira depende de licença prévia do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e não pode estar inserida em terras indígenas (CPRM, 2016; MME, 2018).

O Departamento de Produção Mineral, DNPM (2008)⁵ publicou o livro “Cooperativismo mineral no Brasil”, e os próximos dois parágrafos foram inspirados nesta obra. A palavra cooperativa é definida como associação autônoma, por quotas de participação, de pessoas que se unem de forma voluntária visando à satisfação das suas necessidades (econômicas, sociais e culturais) comuns, com ajuda mútua, através de sociedade coletiva que se organiza para prestar serviços. As cooperativas no Brasil são geridas pela Organização das Cooperativas Brasileiras (OCB) cujo intuito é assegurar os valores do cooperativismo.

Dentre os ramos do cooperativismo está o mineral que é previsto na Constituição Federal de 1988, e é formado por cooperativas com a finalidade principal de pesquisar, extrair, lavar, industrializar e comercializar produtos minerais. Dados de 2006 mostram que nesse ano o país dispunha de 45 cooperativas minerais, com mais de 17 mil associados (DNPM, 2008).

Dentre as principais finalidades deste ramo estão: organizar os associados de forma que juntos eles tenham mais poder econômico e social do que individualmente; a formalização das atividades extrativistas respeitando a legislação aplicável; melhorar as condições de crédito, de tecnologia (acesso ao subsolo e maquinário), de capacitação e saúde ocupacional; estabelecer uma rede de mercado que garanta um preço justo dos produtos minerados; e trabalhar o desenvolvimento da cultura da responsabilidade ambiental e social (DNPM, 2008).

Para Marta (2000) os registros das primeiras atividades garimpeiras no estado de Mato Grosso têm aproximadamente 300 anos, mesma idade da capital Cuiabá, e, da mesma forma que hoje em dia, estas atividades exploravam o bem mineral ouro.

A Figura 3.2 foi aqui exposta com o intuito de mostrar as cooperativas minerais brasileiras. Nela, observa-se que estas organizações estão presentes em todos os estados, exceto Acre, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal. Nota-se também que o MT é o segundo estado com mais cooperativas, ficando atrás de MG. Essas associações englobam várias substâncias garimpáveis, entretanto, no MT, o ouro domina quase a totalidade dos pedidos de lavra garimpeira (DNPM, 2008).

⁵ A Agência Nacional de Mineração (ANM) passou a substituir o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) desde dezembro de 2017.

A Tabela 3.2 traz as reservas garimpeiras oficiais de ouro no Brasil em 2008, onde é possível observar que o MT é o maior detentor dessa reserva, seguido pelo PA e depois por RO.

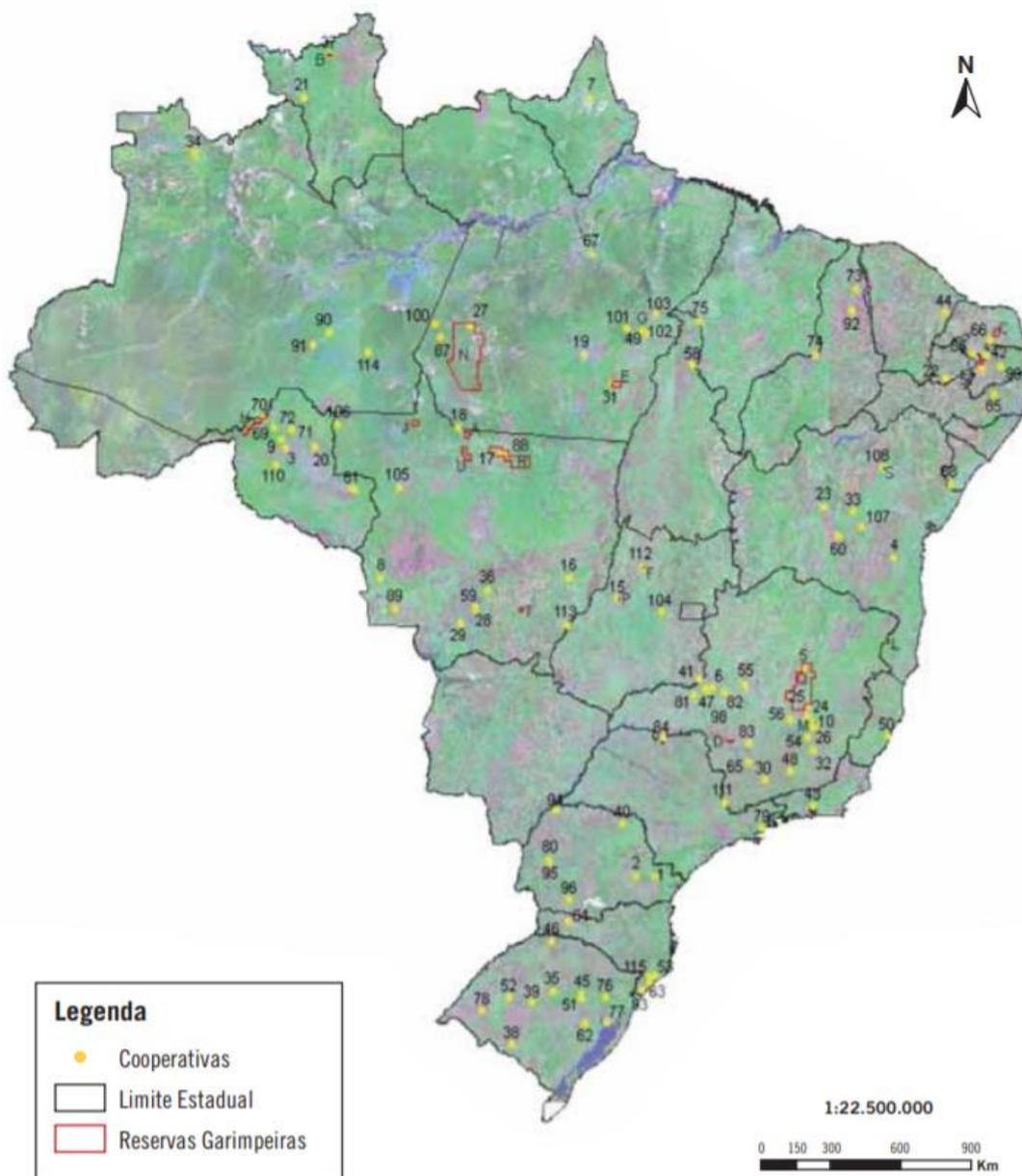


Figura 3.2: Cooperativas minerais no Brasil. Fonte: Adaptado de DNPM (2008).

Entretanto, todos os dados apresentados até aqui se referem aos garimpos legalizados por pessoas físicas ou cooperativas devidamente regularizadas, não alcançando os milhares de garimpos e garimpeiros clandestinos no país.

Esta clandestinidade ocorre, em grande parte, pela burocracia exigida no processo de concessão de lavra, pela falta de fiscalização, pelo pouco tempo necessário para lavrar uma jazida em específico, pela falta de conhecimento, ou falta de instrução dos garimpeiros, que em muitas vezes tem baixa escolaridade, ou são até analfabetos (VIANA, 2007, MME, 2018).

Tabela 3.2: Reservas Garimpeiras Brasileiras de Ouro

Reserva Garimpeira	Localização	Área (ha)
Zé Vermelho	Alta Floresta-MT	50.000,00
Cumaru	São Felix do Xingu-PA	95.145,21
Serra Pelada	Curionópolis-PA	100,00
Rio Madeira	Porto Velho-RO	14.035,53
Rio Madeira II	Porto Velho-RO	20.214,00
Rio Jurema	Alta Floresta-MT	44.625,00
Rejeito Serra Pelada	Curionópolis-PA	74,41
Tapajós	Itaituba-PA	28.745,00
Peixoto de Azevedo	Peixoto de Azevedo-MT	6.575,00
Cabeças	Alta Floresta-MT	121.000,00
Alto Colté	Poxoréu-MT	18.399,96
Total da área (ha)	100,0%	398.914,11
1º MT	60,3%	240.599,96
2º PA	31,1%	124.064,62
3º RO	8,6%	34.249,53

Fonte: Adaptado de DNPM (2008).

Para Viana (2007), esta fiscalização deveria partir dos municípios onde a exploração é exercida; mas são poucos os que conseguem fazer esse controle, seja por descaso, falta de pessoal ou de conhecimento da importância da legalização da atividade.

O garimpo clandestino, além de promover a exploração predatória dos recursos minerais, é palco de frequentes notícias de condições precárias de trabalho, vítimas de trabalho escravo e prostituição. Entretanto, os próprios órgãos responsáveis pela identificação, classificação e fiscalização das atividades mineradoras no país reconhecem a dificuldade em alcançar esses garimpos clandestinos e a falta de dados relativos a eles, o que, logicamente, inclui as barragens e pilhas de rejeitos oriundas destes processos (MME, 2018).

As barragens geradas pelos garimpos não estão registradas pela ANM, e, ainda que estas, na maioria das vezes, não alcancem dimensões grandiosas, são muitas em unidade, e ao contrário das barragens de processamento de minério de ferro, contêm resíduos perigosos e os trabalhos de caracterização, e preocupação ambiental relacionados a elas são bastante escassos.

3.3. Depósito de ouro Porteira

O rejeito estudado neste trabalho pertence ao depósito Porteira, ocorrência de ouro primário existente no norte do estado de Mato Grosso, abrangendo a região de Alta Floresta, importante área de mineração em pequena escala na região.

O depósito Porteira pertence à Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF), uma das principais áreas produtoras do metal país, que, por sua vez, está inserida na parte sul do Cráton Amazônico, região que há cerca de dois séculos, vem produzindo ouro. Na PAAF são descritos três tipos de depósitos auríferos, os disseminados com associação de Au e Cu, os hospedados em veio de quartzo também com associação de Au e Cu, e os hospedados em veio de quartzo com associação de Au e metais básicos relacionados a depósitos epitermais de sulfetação intermediária (CPRM, 2005).

Em 1970, a BR-163 (estrada de Cuiabá-Santarém) foi inaugurada, e, com esse acesso, vieram os primeiros relatos de ouro aluvionar ao longo do sistema do rio Peixoto de Azevedo. A partir daí, na década de 90, a exploração deste metal valioso avançou para níveis mais profundos, sendo comum o uso de *shafts* nos garimpos (CPRM, 2005).

A geologia do depósito Au de Porteira foi descrita em trabalho inédito publicado por Oliveira (2017). Granitos (rocha magmática, intrusiva ou plutônica de grãos finos, médios ou grossos formada pelos minerais principais quartzo, mica e feldspato), mais especificamente os cálcio-alcálicos oxidados, hospedam a maioria das mineralizações de Au do depósito Porteira. O minério é formado basicamente por ouro, pirita e calcopirita bandada e disseminada em veio de quartzo com espessura que varia entre 0,4 até 1,5m. O ouro se apresenta no estado livre, em microfraturas, incluso e nos planos de clivagem da pirita. Quando nas duas últimas situações, o metal se encontra mais puro, enquanto nas duas primeiras ele pode ser classificado como electro, uma liga natural de ouro e prata com vestígios de cobre e outros metais. Assim, a Figura 3.3 traz ilustrações do veio de quartzo mineralizado entre as encaixantes, veios de quartzo com incrustações de pirita e calcopirita, e imagens de microscopia óptica com ouro livre em quartzo, e incluso em pirita e calcopirita.

O processamento de minérios de ouro se destaca da grande maioria dos minérios devido a algumas características singulares. A espécie beneficiada (Au) se encontra na sua forma elementar metálica (devido ao seu carácter inerte em meio aquoso aerado) e suas propriedades marcantes são as suas elevadas densidade e maleabilidade. Enquanto o ouro apresenta densidade de $19,3\text{g/cm}^3$ (a 25°C), os principais minerais associados a ele, quartzo, micas, feldspatos e sulfetos apresentam densidade entre $2,5\text{-}5,5\text{g/cm}^3$ (KLEIN e DUTROW, 2012).

O valor econômico associado a ele também é bastante elevado, a bolsa de valores internacional apontou, em 2020, cotação mínima, em janeiro, de 1.475,90 USD/oz e máxima de 2.070,0 USD/oz, em agosto/2020; sendo oz uma unidade de medida de massa aplicável para metais preciosos e outras gemas equivalente a 31,10g (GOLDPRICE, 2020).

Dados da ANM (2019) mostram que, em 2018, o Brasil ocupou o 11^o lugar (85t-2,8% da produção global) no ranque de produção de ouro. A maior produtora foi a China (16%), seguida por Austrália (10%) e Rússia (8%). Do montante brasileiro, a agência estima que 84% (71,4t) seja provindo de empresas, cujas principais são Anglo Gold Ashanti, Kinross

e Yamana Gold; enquanto 16% tenha origem em garimpos. Entretanto, o próprio órgão reconhece a dificuldade em estimar a produção de ouro garimpeira no país.

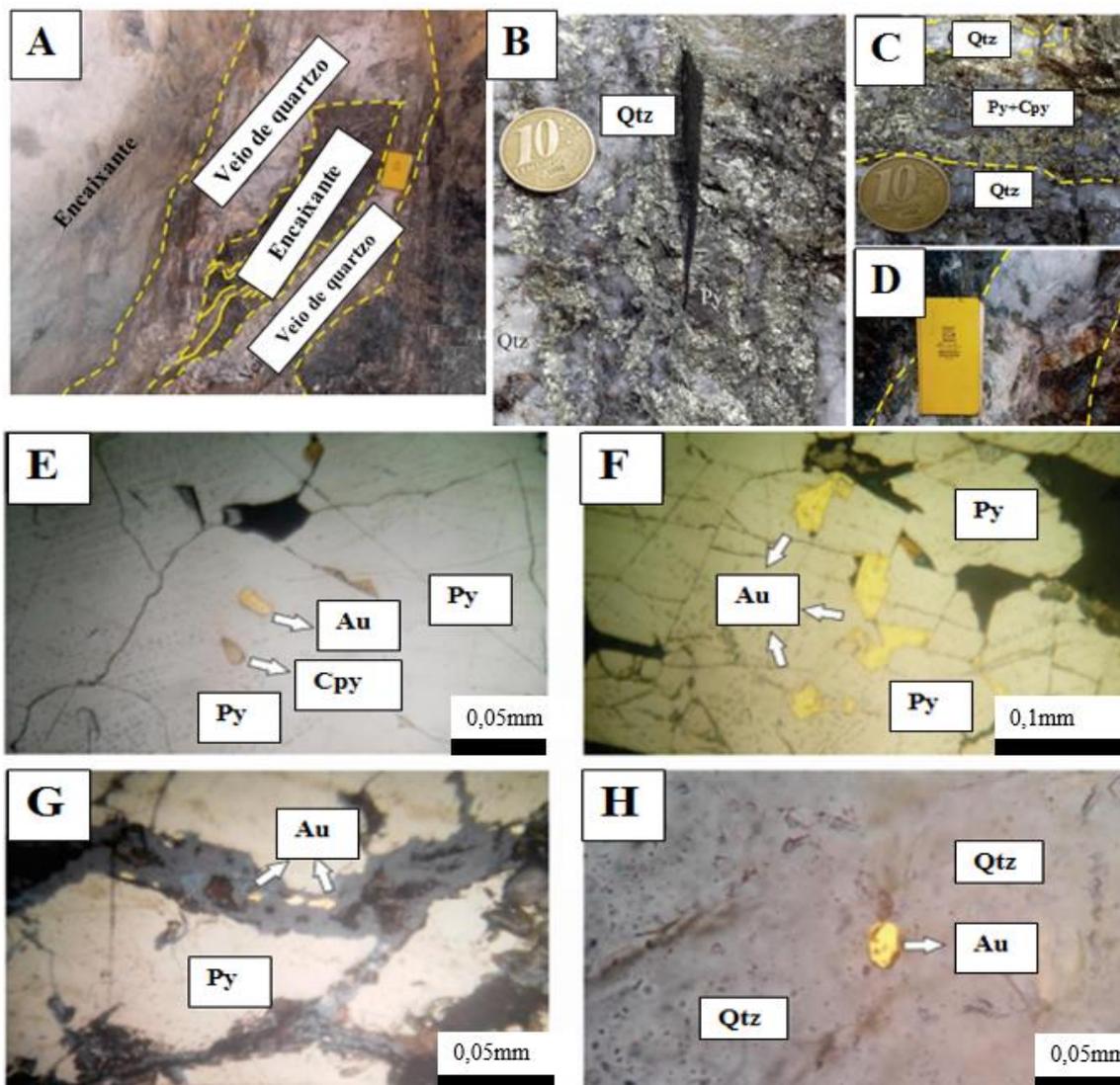


Figura 3.3: Geologia do depósito Porteira. A) Veio mineralizado e rocha encaixante; B) Veio de quartzo (Qtz) bandado com pirita (Py); C) Veio de quartzo bandado com pirita e calcopirita (Cpy); D) Veio de quartzo com pirita disseminada; E) Au e calcopirita inclusos. F) Au e pirita inclusos. G) Ouro disseminado em sulfetos. H) Ouro livre. Fonte: Adaptado de Oliveira (2017).

O beneficiamento de minério de ouro, nas minerações em pequena escala em Mato Grosso, é basicamente composto por fases de adequação granulométrica, ou preparação, envolvendo as etapas de fragmentação (britagem e moagem), classificação (peneiras e hidrociclones), concentração (explorando a forte característica densitária), e etapa hidrometalúrgica (lixiviação). Ainda que a hidrofobicidade (natural ou induzida) também

seja utilizada na concentração deste metal no Brasil e no mundo, não há registro de flotação em operação em garimpo de ouro no MT na presente data.

Segundo a Cooperativa dos garimpeiros de Alta Floresta, COOGAVEP (2018), após o ano 2000, visto que a região era composta por vários depósitos pequenos, os donos dos empreendimentos passaram a realizar a cianetação em pilhas dos rejeitos de ouro das etapas de concentração e amalgamação. As estimativas mais recentes relatam que o depósito Porteira foi responsável pela produção de cerca de 450kg de Au entre 2010 e 2016.

Sobre o uso do cianeto em garimpos legalizados no Brasil, não existe, atualmente, uma previsão de beneficiamento mineral por meio de permissão de lavra garimpeira (PLG) pela Agência Nacional de Mineração. Contudo, a portaria nº 155 em seu Art. 201, inciso 2º do item IX diz:

“A depender do porte da atividade garimpeira, do nível de risco operacional, de previsão de beneficiamento ou do grau de impacto ambiental por ela provocado, a critério do DNPM, será formulada exigência para apresentação de projeto de solução técnica a ser aprovado pelo DNPM”.

Na prática, no estado de Mato Grosso, a utilização do cianeto para o beneficiamento de minério de ouro fica condicionada a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA) e ao Exército Brasileiro. Para tal, o empreendimento, detentor da PLG, deve fazer um pedido à SEMA de Licença ambiental visando uma Licença de Operação (LO) para trabalhar com o cianeto. Uma vez concedidas as licenças, as fiscalizações periódicas, que visam, principalmente a segurança dos trabalhadores, são realizadas pelo Exército uma vez que o cianeto é uma substância controlada por este órgão.

Massaro e Theije (2018) relataram o uso de cianeto para recuperação de ouro em Peixoto de Azevedo, prática não usual em outros garimpos no mundo; o mais comum é a formação de amálgama com mercúrio. Sobre essa peculiaridade, Lins e Monte (2013) classifica os minérios de ouro como minérios de placers, minério de ouro livre e minérios complexos. Os minérios de placers são encontrados em depósitos aluvionares, apresentam baixo teor (<1g/t), entretanto, possuem bom grau de liberação. Dessa forma, o ouro pode ser recuperado com equipamento gravimétrico e amalgamação.

O minério de ouro livre apresenta um teor entre 10 e 20g/t, e, se as partículas de ouro forem maiores que 0,10mm, a concentração densitária com amalgamação é recomendada. Porém, se as partículas contendo o metal forem menores que 0,10mm, indica-se fragmentação por moagem e cianetação para a recuperação do metal. Já os minérios complexos apresentam ouro incluso ou disseminado na matriz de sulfetos, e requerem processos específicos para seu beneficiamento.

A Figura 3.4 ilustra o fluxograma de beneficiamento da mineração em pequena escala de onde o rejeito de minério de ouro foi obtido. O ROM é direcionado para o alimentador de sapatas e o minério é fragmentado por britagem primária, secundária (britadores de mandíbulas) e moagem (moinho de martelo). Após adequação de tamanho, o minério

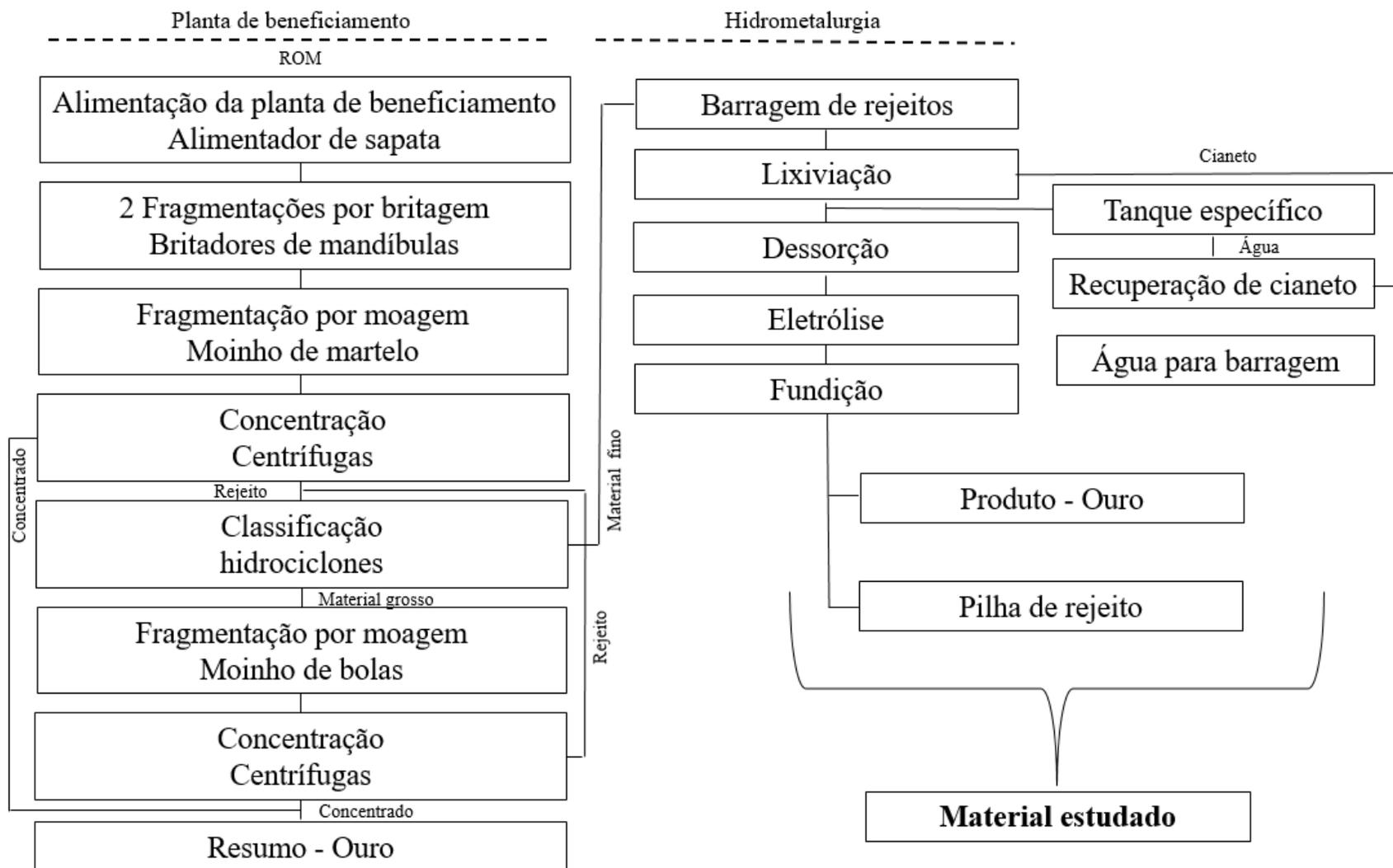


Figura 3.4: Fluxograma de beneficiamento da MPE estudada.

segue para concentradores centrífugos em que o concentrado fica retido nos anéis do equipamento, enquanto o rejeito é direcionado, por bomba, para classificação em aproximados $75\mu\text{m}$ em hidrociclone. O *overflow* é direcionado para a barragem de rejeitos, e o *underflow* é cominuído em moinho de bolas. O minério passa novamente por concentração centrífuga, e o rejeito é bombeado para o hidrociclone, fechando assim um circuito de fragmentação e concentração. O material retido na centrífuga segue para posterior amalgamação.

Já o rejeito disposto em barragem, é lixiviado por cianetação (*dump leaching*), com adsorção em carvão ativado, seguido por dessorção e subsequente eletrólise, para recuperação do ouro. O rejeito dessa etapa, ou rejeito final, é disposto em pilhas de rejeito onde permanece sem destinação, ao ar livre e exposto a intempéries.

O concentrador centrífugo utilizado tem princípios de operação similares ao Knelson, um equipamento de concentração densitária, que conta com a ação da força centrífuga em seu interior devido ao seu movimento rotacional, ilustrado na Figura 3.5. Para Wills e Napier–Munn (2006) e para Luz, França e Braga (2018), nas centrífugas tipo Knelson, a força centrífuga empregada é cerca de cinquenta vezes a força de gravidade, o que amplia a diferença de densidade (propriedade diferenciadora) entre os minerais ali presentes. A força centrífuga enclausura as partículas mais densas em uma série de anéis, dentro de um cone, localizados na parte interna do concentrador; enquanto as mais finas são deslocadas para fora dos anéis, saindo na parte superior do equipamento. O cone é colocado em uma camisa d'água e recebe a injeção de água sobre pressão para evitar que as partículas densas se compactem. Para as centrífugas que não fazem a despesca automática, recomenda-se a drenagem dos anéis pelo menos uma vez ao dia. A proporção de minerais densos, a porcentagem de sólidos, a pressão da água e a alimentação são parâmetros que interferem no tempo de drenagem da centrífuga.

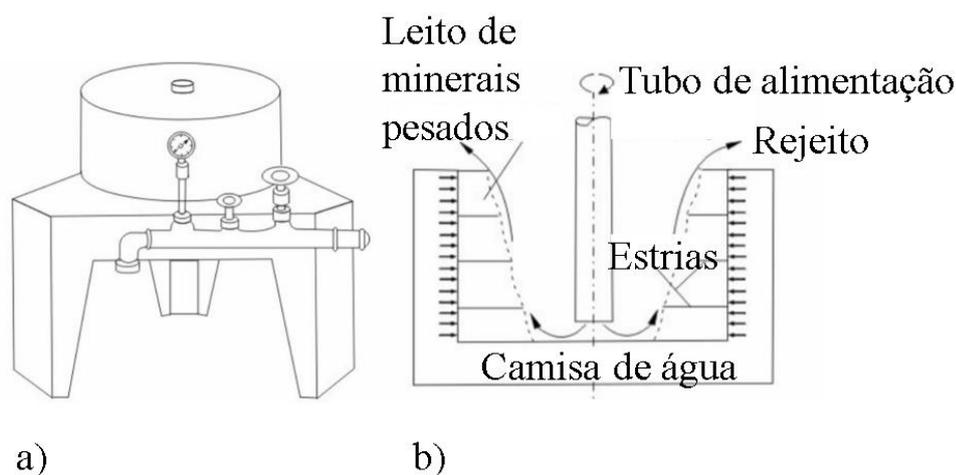


Figura 3.5: Concentrador centrífugo tipo Knelson: vista externa e seção transversal. Fonte: Adaptado de Luz, França e Braga (2018).

3.3.1 Resíduos da cianetação

A cianetação é um processo hidrometalúrgico cujo objetivo é a dissolução do ouro (que não foi recuperado na etapa de concentração) em uma solução de cianeto (CN^-), em pH alcalino e na presença de oxigênio, formando o aurocianeto $[\text{Au}(\text{CN})_2]$, complexo estável de ouro (CIMINELLI e GOMES, 2002).

A dissolução do ouro exige a combinação de um agente oxidante com outro complexante específico que seja capaz de estabilizar os íons aurosos em solução. Assim, esta lixiviação baseia-se na capacidade do cianeto em formar um complexo estável com o ouro, como ilustra a reação química da Equação 3.1:

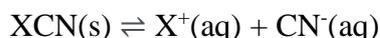
(3.1)



A concentração do complexo formado dicianoaurato, $2\text{Au}(\text{CN})_2^-$, no equilíbrio, é muito superior à concentração dos reagentes.

Neste processo o cianeto é utilizado na forma de sais, principalmente como cianeto de sódio (NaCN) e de potássio (KCN), devido às suas altas solubilidades em água, próximas a 50g/L (25°C), conforme a reação da Equação 3.2:

(3.2)



Onde X representa Na ou K. Após a dissolução do sal, o íon cianeto é hidrolisado e forma o ácido cianídrico, conforme a Equação 3.3:

(3.3)



O ácido cianídrico apresenta elevada pressão de vapor, o que favorece a formação do gás HCN. Na indústria, a formação deste gás é evitada por questões de custo (perda de reagente) e também pela elevada toxicidade e periculosidade do gás cianídrico. Em pH inferior a 9,0 a espécie HCN (não dissociada) predomina, enquanto em pH superior a 9,0, a espécie CN^- (dissociado) predomina no sistema. Dessa forma, para evitar a formação do gás cianídrico, o pH do processo deve ser superior a 9,0 (RITCEY, 2005).

O consumo total de cianeto na lixiviação depende de fatores como a composição química do material que está sendo tratado, pH e tempo de contato do reagente com a polpa. Entretanto, nem todo reagente adicionado, é de fato consumido na dissolução do ouro. Parte considerável é volatilizada (formação de HCN), principalmente em ambientes não controlados, como é o caso dos garimpos; e a maior fração é consumida na complexação de íons metálicos como o ferro $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ e cobre $[\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$, que são ainda mais estáveis que o cianocomplexo de ouro, e por isso são formados durante a cianetação.

Outros metais comumente associados a minério de ouro, tais como Ag, Zn, Cu, e Ni também formam complexos estáveis (RITCEY, 2005; NEVES *et al.*, 2014).

No garimpo em questão, a lixiviação é realizada em pilhas (baixo custo de investimento e operacional), possui ciclos longos de operação e alto consumo de reagente (NaCN). A solução segue para a adsorção em carvão ativado, onde o complexo $[Au(CN)_2]$ é adsorvido seletivamente, deixando, na solução residual os demais cianocomplexos metálicos dispostos em pilhas de rejeitos, formando o chamado resíduo de cianetação.

Além do cianeto residual, o rejeito da lixiviação de ouro também pode conter metais tóxicos, usualmente chamados de emetais pesados (em alguns casos indevidamente). Tsutiya (1999) diz que embora os metais pesados sejam aqueles elementos químicos com peso específico maior que $5g/cm^3$ e/ou número atômico maior do que 20, esta expressão é comumente utilizada para designar os elementos químicos com potencial para contaminar o meio ambiente, provocando danos ao mesmo. Dentre esses, destacam o alumínio, antimônio, arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cobalto, cromo, ferro, manganês, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco. Todos são encontrados naturalmente em solos provindos de formações rochosas e o seu grau de toxicidade depende do organismo vivo ou da sua utilização.

Passos, Castilhos e Silva (2016) avaliaram o rejeito de processamento de minério de ouro disposto em barragem (mina não identificada em MG) quanto a liberação de metais potencialmente tóxicos por contato com extratores naturais presentes no meio ambiente. Foram conduzidos ensaios de extração sequencial com água destilada e ácido cítrico em um total de 166h. Os metais As, Cd, Cr, Pb, Se e Zn foram analisados pelo método de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Como resultado, o ácido cítrico apresentou uma maior capacidade de extrair metais potencialmente tóxicos do material lixiviado devido à solubilização dos mesmos em meio ácido.

Passos *et al.* (2018) propuseram a avaliação ecotoxicológica de rejeito de ouro lixiviado por cianetação (mina não identificada em MG) para a sua disposição em Latossolo. Os metais foram analisados pela técnica ICP-OES e os teores de Cu, As, Al e Fe estavam superiores aos recomendados pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA 307/2002. Dessa forma, para que o rejeito fosse disposto em Latossolo, a sua fração não deveria passar dos 15% da composição (solo e rejeito), para garantir que não houvesse perda da biomassa local.

Kulkarni, Golder e Ghosh (2019) chamam atenção sobre os vários ramos industriais que produzem resíduos ricos em metais tóxicos, ainda hoje poucas empresas enxergam a disposição destes descartes como responsabilidade social, apesar de estar estabelecido na legislação federal, a responsabilidade do gerador. Incineração, disposição em aterro, descarte oceânico, estabilização/solidificação, e uso como material de construção civil alternativo são algumas das possibilidades de destinação de resíduos. A aplicabilidade de cada uma dessas alternativas depende das características dos resíduos; a incineração provoca a liberação de gases tóxicos; a disposição em aterro e a solidificação podem permitir que a liberação de componentes tóxicos ao longo do tempo. Segundo os autores, existem alguns trabalhos de sucesso no uso de lamas contendo metais tóxicos na estabilização de solo argiloso, inclusive com melhorias em suas propriedades mecânicas, tanto na substituição parcial de areia quanto na constituição de cimento.

O uso de resíduos de baterias como constituinte de tijolo queimado foi o foco do trabalho de Kulkarni, Golder e Ghosh (2019). Os tijolos foram avaliados quanto a resistência a compressão, absorção de água e liberação dos metais tóxicos. Os melhores resultados foram alcançados com a adição de até 20% de resíduos de baterias, queima entre 1000-1050⁰C, produzindo tijolos com resistência a compressão uniaxial e absorção de água atendendo às normas indianas. Testes de lixiviação foram utilizados para analisar a liberação metais pelo tijolo após a queima. Ainda que o pH exerça influência na lixiviação destes metais, os tijolos foram considerados adequados para a construção civil.

3.4. Construção em terra

O termo construção em terra pode ser definido como o sistema construtivo que utiliza a terra como matéria prima principal na execução de vedações sem que ela passe por processo térmico. Diversos autores relacionam a construção em terra com o surgimento das primeiras cidades e/ou aglomerações das quais se tem registro (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012; SAMEH, 2014; SÉMON e GAUZIN-MULLER, 2016).

Ferreira (2012) e Franke (2017) discorrem sobre a cronologia da terra como material de construção. Para os autores este saber é intuitivo e simples, basta observar as construções em terra feita por animais. O exemplo mais clássico é o da casa do João de barro. Já para o homem, os indícios mais remotos são do período Neolítico ou da Pedra polida, mais conhecido como o último período da pré-história, antecedente ao surgimento da escrita, quando o homem adotou o sedentarismo, a agricultura e dominou a técnica de polimento de rochas para a confecção de ferramentas em 10.000 a.C.

A arquitetura em terra crua foi então se desenvolvendo segundo avançavam as civilizações, existem registros de construções simples e de grande feito em cinco continentes desde antes do nascimento de Cristo até os dias atuais. Exemplos em todo mundo foram abordados por Franke (2017) e serão aqui resumidos nos próximos seis parágrafos e acrescidos de informações provindas de outras fontes. Gonçalves e Gomes (2012) adicionam que além dessas habitações, as construções em terra representam cerca de 10% da Lista do patrimônio cultural da humanidade catalogada pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, UNESCO.

No continente Asiático a Muralha da China, feita com taipa (técnica de construção em terra) e revestimento em pedra foi “inaugurada” no século XVII, é referência pelos seus mais de 21km de extensão. Ainda na Ásia, vale ressaltar Shibam ou a “Manhatan do deserto”, primeira cidade vertical do mundo, no Iémen do Sul, onde prédios com cerca de 30m de altura e até oito pavimentos foram levantados no século XVI com terra compactada. A Torre de Babel e o Arco de Ctesifonte, ambos no Iraque foram monumentos de antes de Cristo considerados de arquitetura moderna para a época (FRANKE, 2017).

Na África, os saberes das construções vernáculas são provindos das migrações do continente asiático, principalmente no Oriente Médio onde se destacam o Vale do Draa e a Aldeia de Ait-Bem-Haddou, duas fortalezas no Marrocos do século I, o portal de acesso à cidade de Timimoun, uma cidade edificada em meio a dunas também dessa época na Argélia, e as várias construções que envolvem terra compactada no Egito de antes de

Cristo, como por exemplo, o grande templo de Ramsés II, onde houve escavação em montanhas (SAMEH, 2014; FRANKE, 2017).

Estes dois continentes, através da bacia do Mediterrâneo, onde ocorria a zona do comércio, introduziram as técnicas de construção em terra crua à Europa, região de alta migração, onde estes métodos foram adaptados segundo os diferentes climas, solos e culturas do vasto território. Geralmente, nessa região, a edificação em terra está associada a construções bélicas (fortalezas e castelos) e também se encontra disseminada em habitações da população local do século XX. Na zona Ibérica, devido à forte influência árabe, a terra também é observada em vários tipos de construções, inclusive nos majestosos, como no palácio Alhambra (finalizada no século XIV) em Granada, no sul da Espanha (SÉMON e GAUZIN-MULLER, 2016; FRANKE, 2017).

Entretanto, devido principalmente a maior disponibilidade de outros materiais tais como rocha e madeira, a terra não foi tão valorizada como material de edificação quanto nas duas primeiras regiões. Além disso, acredita-se que a terra era vista com certa inferioridade, uma vez que a arquitetura erudita utilizava a pedra como fonte principal. Como exemplo, no leste da Europa, as até hoje famosas construções dos gregos e romanos, a citar o Coliseu, o Panteão, os templos gregos e o aqueduto de Segóvia tinham a rocha como material base. Ainda que no século XIX, devido ao período de escassez de materiais industrializados pós-guerra, a arquitetura em terra tenha ganhado força nesse continente, ela ainda não era vista como material nobre Espanha (SÉMON e GAUZIN-MULLER, 2016; FRANKE, 2017).

No continente Americano existem resquícios e monumentos ainda resistentes, como a pirâmide feita em adobe Huaca del Sol no Peru, do séc. I desde antes das suas colonizações, principalmente na América Andina. Também neste país e da mesma época, foi construída a vasta cidade inteiramente levantada a partir do século XII com terra crua, Chan Chan, complexo formado por dez pequenas cidadelas que abrigaram cerca de cinquenta mil habitantes (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012; FRANKE, 2017).

A América do Norte é atualmente referência em arquitetura em terra crua contemporânea desde o início da crise energética no século XX, quando modernizaram os seus métodos e legitimaram as técnicas de adobe e taipa, que são vistas em habitações modernas de famílias de classe média (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012; FRANKE, 2017).

Com panorama similar ao dos Estados Unidos, a edificação em terra crua é amplamente desenvolvida e utilizada na Austrália e foi introduzida através da colonização britânica. São inúmeras as empresas de construção especializadas neste tipo de material, e daí o grande número de edificações modernas feitas de terra como, por exemplo, a Layer House, projeto de 2017 listado pela Best House & Best Use of Rammed Earth⁶ como construção contemporânea em terra (ARCHDAILY, 2018).

No Brasil, o conhecimento em construção em terra é consequência da colonização portuguesa e da cultura africana, uma vez que não existem registros deste tipo de edificação antes desse marco. Ainda assim, Olender (2006) acredita que os índios contribuíram sim para a adequação desses métodos, uma vez que eles utilizavam madeira, folhas de palmeira e outras árvores para a construção das ocas, e que essa prática foi

⁶ A revista Best House & Best Use of Rammed Earth pode ser interpretada com o título Melhor casa e melhor uso de terra compactada.

observada nas primeiras cidades brasileiras. O pau-a-pique, técnica onde a estrutura da habitação era feita de madeira com vedação de barro e cobertura de folha de palmeira ou palha foi a mais difundida na interiorização do país; o que mostra a junção entre as culturas portuguesa, africana e indígena.

Cidades na Bahia, Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Mato Grosso mantiveram a terra como material base mesmo após a colonização lusitana, constituindo, até hoje, o patrimônio artístico cultural brasileiro. Estas construções foram impulsionadas, principalmente para fins militares, religiosos, pelos bandeirantes durante a interiorização do país e por fim, pelo período do café (EIJK, 2006).

Assim como na Europa, após a Revolução Industrial do século XIX, a construção em terra passou por um período de obsolescência no Brasil devido a uma maior procura de materiais industrializados e processos automatizados. Dentre os principais fatores para tal vêm a alta densidade de centros urbanos que nem sempre dispunha da quantidade de terra necessária para as edificações, e o transporte de terra acarretava em custos extras, o que encarecia um material simples. Existia também certo paradigma sobre classe social menos privilegiada e falta de segurança (estabilidade da obra); ademais do monopólio industrial que estimulava materiais “superiores” como o aço e o concreto (EIJK, 2006; OLENDER, 2006; SAMEH, 2014).

Afim de ilustrar as construções em terra, sem o processo de cozimento, pelo mundo, a Figura 3.6 traz exemplos da construção em terra no Brasil. Já a Figura 3.7 ilustra este tipo de alvenaria nos continentes asiático, africano e europeu. Por último, a Figura 3.8 traz os exemplos citados para a América e para a Oceania.

BRASIL



Figura 3.6: Exemplos de construção em terra no Brasil ⁷.

⁷ As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 foram construídas para este trabalho através de imagens do Google. As fontes utilizadas estão descritas no Anexo I.

Ásia



África



Europa



Figura 3.7: Exemplos de construção em terra na Ásia, África e Europa

AMÉRICA DO SUL

HUACA DEL SOL



CHAN - CHAN



AMÉRICA DO NORTE

TAIPA NA CONSTRUÇÃO DE CASAS



TAIPA NA CONSTRUÇÃO DE CASAS



OCEANIA

CASA EM TAIPA NA AUSTRÁLIA, SÉC XXI



LAYER HOUSE



Figura 3.8: Exemplos de construção em terra na América e na Oceania.

A crescente preocupação ambiental, a nível intercontinental, defende a construção em terra devido, principalmente, aos impactos gerados pelos materiais industrializados da construção civil que estão diretamente relacionados ao alto consumo de energia, água, emissão de poluentes, contaminantes e produção de descartes (BESTRATEN, HORMÍAS e ALTEMIR, 2011; PACHECO-TORGAL e JALALI, 2012; DOMINGUES, 2015; RAMOS *et al.*, 2015).

Sobre estes impactos, Pacheco-Torgal e Jalali (2012) apontam que na construção de alvenaria em terra, o material necessário quase sempre está próximo da obra, o que reduz as emissões de gases poluentes para o transporte de insumos; bem como os seus resíduos podem ser descartados nas redondezas. O mesmo não acontece com a alvenaria industrializada (convencional), que além do deslocamento deve ser descartada em local apropriado. Bestraten, Hormías e Altemir, (2011) discorrem sobre a menor emissão de CO₂ em construção em terra ao apresentar a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Emissão de CO₂ em alvenaria em terra e industrial

Construção		Densidade (kg/m ³)	Emissões de kg de CO ₂ /kg utilizado	Emissões kg de CO ₂ /m ³ construído
Em terra	Terra compactada (sem estabilização)	2.200	0,004	9,7
	Adobe	1.200	0,006	74,0
"Industrializadas"	Concreto armado (produzido <i>in situ</i>)	2.360	0,140	320,0
	Concreto armado pré-fabricado (2% aço)	2.500	0,180	455,0

Fonte: Adaptado de Bestraten Hormías e Altemir, (2011).

Ramos *et al.* (2015), resumem as demais vantagens e desvantagens da construção vernácula, adaptadas na Tabela 3.4. Atualmente, na construção de uma casa, o que se vê é uma busca por obras mais sustentáveis, com energia solar e reaproveitamento da água de chuva, por exemplo, o que não só traz economia financeira (a médio ou em longo prazo) para o morador, mas também preserva os nossos recursos naturais. Assim, a construção em terra ganha força como uma forma de diminuir os impactos ambientais gerados pela construção civil a nível mundial.

Tabela 3.4: Vantagens e desvantagens da construção em terra

Construção em terra	
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • O solo é um material disponível, de fácil acesso em diversas regiões terrestres; • Em algumas regiões mais isoladas a terra é a única opção de material de construção; • As técnicas de construção em terra não exigem um treinamento prévio muito aprofundado - de fácil aprendizagem; • A terra é um material reutilizável; • Além de não combustível, o solo apresenta boa resistência ao fogo; • Pode ser aplicada em várias partes da construção; • Não produz subprodutos/poluentes durante a fabricação dos elementos construtivos.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzida durabilidade principalmente em áreas de elevada precipitação, o que exige maior frequência de manutenção; • Baixa resistência à tração, flexão e abrasão quando não reforçadas quando comparada a construções "industrializadas". • Associados a classes menos favorecidas

Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2015).

3.4.1 Técnicas de Construção em Terra

Para Pacheco-Torgal e Jalali (2012) e Sémon e Gauzin-Muller (2015), existe uma grande diversidade de aplicação da terra crua enquanto material construtivo, sendo possível utilizá-la na construção de piso/pavimento, coberturas, paredes, escadas ou ainda como enchimento isolante. Os autores discorrem sobre as várias técnicas de construção em terra utilizadas no mundo que podem ser divididas em três grandes grupos: Monolítica (*In situ*), Alvenaria (Por Unidade) e Por Enchimento e Revestimento (Combinação com outros materiais). Gonçalves e Gomes (2012) sugerem ainda um quarto grupo, Sistemas de ligação.

Segundo Pacheco-Torgal e Jalali (2012) e Sémon e Gauzin-Muller (2015), a técnica monolítica, ou, *in situ*, de construção em terra é identificada onde não há diferenciação entre material e componente construtivo, onde a terra pode ser designada como:

- Terra escavada onde a ideia principal é a de se escavar o solo em zonas com boas características mecânicas a ponto de não desabar, formando grutas;
- Terra plástica que consiste em moldar a terra para construir blocos com a finalidade de facilitar a moldagem do material;
- Terra empilhada ou *cob* onde a terra é modelada em estado plástico ou empilhada em forma de bolas que são regularizadas para atingir a forma final desejada;
- Terra compactada ou Taipa, que se dá através da prensa ou compressão de camadas de terra com baixa umidade dentro de formas, geralmente pilão de madeira, ou, mais modernamente, com equipamentos pneumáticos.

Também para Pacheco-Torgal e Jalali (2012) e Sémon e Gauzin-Muller (2015), no grupo Enchimento e Revestimento existem associações entre a terra que desenvolve um papel secundário e outros elementos (papel primário) que suportam o sistema, tais como madeira, cana e bambu, a terra é subdividida em:

- Terra de recobrimento por revestir estruturas como taipa e adobe;
- Terra sobre engradado ou terra de guarnição, onde se faz a taipa de mão aplicando terra numa estrutura de madeira ou bambu;
- Terra palha, onde uma mistura de argila líquida e palha é aplicada através de formas sobre uma estrutura de madeira;
- Terra de enchimento, em que se utiliza a terra para preencher os panos de alvenaria.

A técnica Alvenaria de construção apresenta as variações que englobam as vedações em terra, portantes ou não, utilizando blocos ou tijolos de terra secos naturalmente ao ar. Esses sistemas por unidade podem constituir formas diversas, o que permite uma maior flexibilidade da construção. De acordo com Pacheco-Torgal e Jalali (2012) e Sémon e Gauzin-Muller (2015), estas formas podem ser, por exemplo, arcos, cúpulas e abóbodas e na sua execução foram utilizados tipos de unidades pré-fabricadas que interagem com a estrutura após a secagem tais como:

- Adobes que podem ser mecânicos, manuais e moldados, que são blocos de terra bastante argilosa e areia moldados sem compactação e secos ao tempo no local de construção;
- Terra extrudada, que deriva do modo de produção dos tijolos cerâmicos. Consiste num método de fabricação por extrusão que permite obter não só blocos para alvenaria, mas também placas pré-fabricadas que podem ser aplicadas como revestimento de paredes;
- Tijolos ou blocos de terra comprimida, ou BTC, que são blocos modernos que anteriormente eram blocos apilados, prensados ou cortados através de formas de madeira e um pilão, ou recortados diretamente da terra. Atualmente estes blocos são fabricados com o auxílio de máquinas manuais ou hidráulicas.

A divisão Sistemas de Ligação foi sugerida, mais recentemente, por Gonçalves e Gomes (2012), e se refere aos sistemas que utilizam a terra como argamassa de assentamento para blocos de alvenaria. Os grandes grupos de técnicas de construção possuem subdivisões cujas principais estão ilustradas na Figura 3.9.

As técnicas anteriormente apresentadas descrevem os tipos principais de construção com terra e as suas principais variedades de formas de execução. Seus exemplos retratam diversos modelos próprios de se trabalhar com terra, que podem ser combinados entre si, associando-se para melhor atender as circunstâncias exigidas do seu local de aplicação.

Dentre elas, o adobe, pertencente ao grande grupo Alvenaria, se destaca por ser a técnica com o maior número de edificações registradas ao longo dos anos no globo terrestre, graças a sua simplicidade e baixo custo de fabrico (CHUMBINHO, 2017).



Figura 3.9: Diagrama simplificado dos diferentes grupos de sistemas construtivos que utilizam a terra como matéria-prima (Monolítica, Alvenaria, Por Enchimento e Revestimento e Sistemas de ligação)⁸.

⁸ A Figura 3.9 foi construída para este trabalho através de imagens do Google. As fontes utilizadas estão descritas no Anexo I.

Como já mencionado, os adobes são blocos de solo e água moldados à mão em moldes de madeira com o formato almejado. Os tijolos são desmoldados ainda úmidos e passam pelo tempo de cura na temperatura ambiente até alcançarem a resistência a compressão desejada. É comum estes tijolos terem a sua estrutura reforçada e as fissuras minimizadas com o incremento de fibras vegetais. O reboco com argamassa ou algum tipo de tratamento superficial também é prática usual para evitar os efeitos indesejáveis do contato com a água (CHUMBINHO, 2017).

Considerada como técnica que surgiu da evolução do adobe, os blocos de terra comprimida, BTC, ou tijolos de solo-cimento, surgiram no início do século XX, e se diferenciam do adobe uma vez que a mistura de solo, por ser prensada, confere maior densidade, durabilidade e resistência mecânica. No presente trabalho é dado enfoque à técnica de Alvenaria tijolo de solo-cimento e um maior detalhamento deste método construtivo será discutido a seguir.

3.5. Tijolo de solo-cimento

A NBR 8491 (ABNT, 2012) define tijolo de solo-cimento como um componente de alvenaria, constituído de uma mistura homogênea, compactada, endurecida, que não passa por processo de cozimento, composta por solo, cimento Portland e água. Se o tijolo possuir volume igual ou superior a 85% do seu volume total aparente, ele é denominado tijolo maciço de solo-cimento; já, se o seu volume for inferior aos 85% do total aparente, ele é chamado de tijolo vazado de solo-cimento.

Lima (2017) acredita que esta técnica tenha origem no continente europeu, com registros a partir do século XVIII, e pode ser entendida como a “evolução do adobe”. Isso porque a principal diferença entre as duas técnicas de construção em terra é que a mais moderna requer uma menor quantidade de água por passar por processo de prensagem; refletindo no menor índice de retração do material, na possibilidade de estocagem imediata, mas, também, na necessidade de estabilizantes químicos.

O primeiro equipamento, ou prensa, de que se tem registro para a fabricação de tijolos de solo-cimento foi desenvolvido no centro de pesquisa Cinva, na Colômbia, em meados dos anos 50, e chamado de Cinva-Ram, tendo permitido a produção de tijolos em terra crua de forma mais acelerada. Hoje, as prensas podem ser, além de manuais, hidráulicas, permitindo um processo inteiramente automatizado. O seu dimensionamento envolve questões como produção diária, dimensão dos tijolos, prensagem e tipo de material utilizado (RUBIANO e CAICEDO, 2008, SOARES *et al.*, 2016).

Para que estes tijolos possam ser comercializados no Brasil, eles devem atender a NBR 8491 (ABNT, 2012) que determina valores dimensionais, de resistência à compressão e de absorção de água admissíveis para estes componentes de alvenaria. Sobre a análise dimensional, o comprimento (c) corresponde a maior dimensão das faces de assentamento, a largura (l), a menor dimensão, enquanto a altura (h) é a distância entre elas. A normativa classifica os dois tipos principais de tijolos tipo solo-cimento, A e B, representados na Tabela 3.5. Entretanto, outras dimensões podem ser aceitas, desde que o tijolo permaneça com a altura menor que a sua largura.

Tabela 3.5: Análise dimensional de tijolos tipo solo-cimento

Tipos e dimensões nominais (mm)			
Tipos	c	l	h
A	200	100	50
B	240	120	70

*Outras dimensões podem ser aceitas desde que $h < l$

Fonte: Adaptado de NBR 8491 (ABNT, 2012).

A NBR 10834 (ABNT, 2012) trata dos requisitos para que uma mistura homogênea de solo, água e cimento seja considerada um bloco de solo-cimento. Basicamente, o que difere as terminologias tijolo e bloco de solo-cimento são as dimensões das unidades. Enquanto os tijolos obedecem às proporções expostas na Tabela 3.5, os blocos devem apresentar 300,0mm de comprimento, 150,0mm de largura e 150,0mm de altura, ou outras medidas, desde a altura permaneça igual ou superior à sua largura. Da mesma forma que os tijolos, podem ser maciços ou vazados. No presente trabalho é dado enfoque ao tijolo de solo-cimento.

Vale comentar sobre a diferença entre os tijolos ou blocos de solo-cimento e o bloco de terra comprimida, ou BTC. Os BTCs também constituem uma mistura homogênea, compactada, endurecida e não cozida de solo, água e estabilizante. A questão é que, no Brasil, adotam-se os termos tijolo e bloco de solo-cimento pois os cimentos Portland são os ligantes aceitos, e são designados por normas técnicas. Os BTCs podem passar por estabilização química, por cimento, cal, betume, e outros produtos naturais ou sintéticos. Na literatura internacional, esses componentes de alvenaria são designados como *Compressed Earth Block (CEB)*, *Pressed Earth Block* ou *Compressed Soil Block*.

Segundo a Associação Nacional do Tijolo Ecológico, ANITECO (2020), os tijolos e blocos de solo-cimento e os BTCs são comumente chamados tijolos ecológicos, dentro e fora do Brasil, devido ao fato de não ser necessário o uso de fornos para a sua fabricação, o que, além de gerar economia energética, evita o desmatamento para a obtenção de lenha e reduz as emissões de gases poluentes na atmosfera. Em adição, esses tijolos permitem que resíduos industriais sejam incorporados na sua composição, e não utilizam o barro vermelho (matéria-prima tradicional dos tijolos convencionais), o que evita a degradação do meio ambiente causada pela extração de mais recursos.

Além das vantagens ambientais, a fabricação dos tijolos ecológicos promove uma maior oportunidade local, pois, além das matérias-primas (que são utilizadas para a produção dos tijolos) geralmente se encontram próximas aos locais de produção, a técnica é de fácil execução, não exigindo mão de obra especializada.

De acordo com norma técnica brasileira NBR 8491 (ABNT, 2012), o termo reentrância (r) pode ser entendido como cavidade que entra novamente formando um ângulo ou curva para o interior. Se o tijolo possuir reentrância, esta deve estar a no mínimo 25mm das paredes no seu entorno (a partir das arestas paralelas às faces da reentrância) e apresentar profundidade máxima de 13mm. Já, se os tijolos possuírem furos, estes devem ter eixo

perpendicular à superfície de assentamento, a espessura (e) mínima das paredes no seu entorno deve ser de 25mm e a distância (d) mínima entre os dois furos deve ser de 50mm. A Figura 3.10 ilustra, da esquerda para a direita, um tijolo maciço com reentrância, um tijolo vazado e um bloco de solo-cimento vazado.

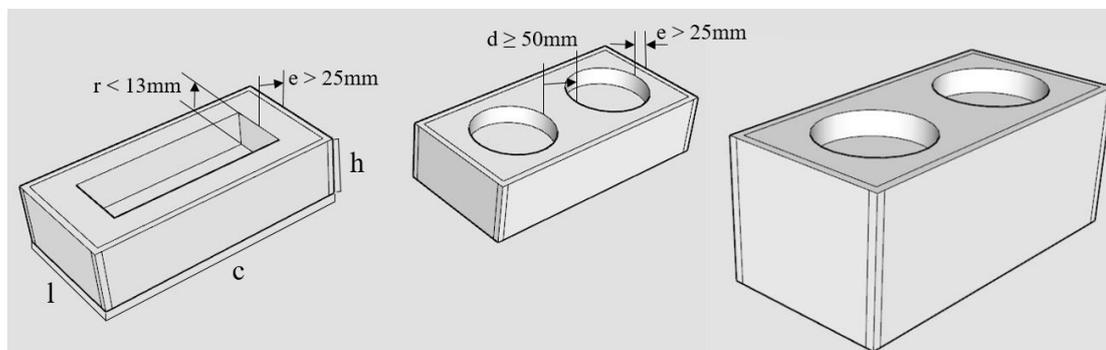


Figura 3.10: Tijolo maciço de solo-cimento com reentrância, tijolo vazado de solo-cimento e bloco de solo-cimento vazado. Fonte: Adaptado de NBR 8491 (ABNT, 2012).

A unidade de compra é o tijolo individual ou o milheiro (mil tijolos). O lote é aprovado se os tijolos, atendem ao especificado na NBR 8491 (ABNT, 2012). Sobre o parâmetro resistência à compressão, cada unidade deve resistir ao valor mínimo de 1,7MPa, e a média do lote de 2,0MPa. Já sobre absorção de água, a normativa pede um limite máximo individual de 22% e média do lote de 20%. Esta média diz respeito a inspeção que deve ser feita a cada produção superior a 10000 unidades, com a retirada de 10 aleatórias que serão testadas.

A NBR 10833 (ABNT, 2012) é a normativa que orienta a produção de tijolos de solo-cimento que devem ser prensados em máquina manual ou hidráulica e secos naturalmente até atingir a idade de cura. A orientação é de que o solo escolhido tenha granulometria 100% inferior a 4,75mm, entre 10-50% menor que 0,075mm, apresente Limite de liquidez $\leq 45\%$ e Índice de plasticidade $\leq 18\%$. A norma técnica também recomenda que a água utilizada para a fabricação desses tijolos esteja em acordo com o que orienta a NBR 15900 (ABNT, 2009). Em resumo, se a água a ser utilizada for a de abastecimento público, ela é considerada adequada para este fim. Entretanto, se for água natural de superfície, de captação pluvial, residual industrial, ou salobra, deve passar por análises exigidas pela norma. Se for proveniente do tratamento de esgoto, não deve ser utilizada. A Tabela 3.6 traz as principais exigências para a escolha do solo para a fabricação de tijolos de solo-cimento.

Existem alguns parâmetros que devem ser observados na fabricação de tijolos ecológicos. A pressão de prensagem, o tipo de solo e a sua distribuição granulométrica, o tipo e a quantidade de estabilizante, o teor de umidade e as condições de cura são os mais relevantes (HALLAL, SADE e NAJJAR., 2018).

Tabela 3.6: Principais exigências para a fabricação de tijolos de solo-cimento

**Exigências para a seleção de solo para a fabricação de
tijolo de solo-cimento**

100% Passante na peneira de abertura 4,75mm

Entre 10-50% Passante na peneira de abertura 0,075mm

Limite de liquidez $\leq 45\%$

Índice de plasticidade $\leq 18\%$

Fonte: Adaptado de NBR 10833 (ABNT, 2012).

De uma forma geral, quanto maior a pressão de prensagem do solo, maior será a resistência à compressão do tijolo formado. As prensas manuais, por exemplo, compactam o solo com pressões por volta de 2MPa, enquanto as hidráulicas alcançam pressões mais elevadas, segundo valores especificados pelo fabricante (MOTTA *et al.*, 2014).

O tipo de solo a ser prensado também é um fator importante na produção destes tijolos sustentáveis. Argilominerais e a fração granulométrica argila podem ser altamente expansivos, o que prejudica a estabilidade da alvenaria. Entretanto, as características do solo podem ser melhoradas através da utilização de aditivos, os mais comuns são cimento (Portland) e cal, mas também existem registros de uso de resinas e pozolanas. Todos estes exemplos possuem o mesmo princípio básico de ação no qual o aditivo interage com a água de forma a preencher os espaços vazios do material agregando a ele uma maior resistência. A dosagem destes reagentes depende do solo matriz e das qualidades almejadas do tijolo; mas pode-se dizer que quanto maior a fração argilosa, maior será essa proporção (LIMA, 2013).

A granulometria do material, quando não se encontra naturalmente nas faixas ótimas de tamanho, também pode ser corrigida. Como exemplos, se o solo tem partículas excessivas na fração argila, areia pode ser adicionada. Já se possuir pouca quantidade na faixa fina, aditivos químicos podem ser adicionados para preencher os vazios do molde (MOTTA *et al.*, 2014).

O teor de umidade do solo é um parâmetro que compromete as características finais dos tijolos produzidos. Quando muito alto, o tijolo pode sofrer alta retração no processo de secagem, favorecendo o surgimento de fissuras. Quando demasiado baixo, a terra não se une de forma homogênea e não se adequa ao molde. Sobre o tempo de cura, ou tempo após a prensagem em que as unidades ficam expostas a temperatura ambiente, em regiões quentes e de baixa umidade é recomendado cobrir os tijolos, com uma lona plástica, por exemplo, para que a água não seja evaporada e assim não haja prejuízos referente ao tempo necessário para a hidratação do cimento (GRANDE, 2003; LIMA, 2017).

O Quadro 3.1 resume as normas técnicas brasileiras que tratam desses componentes de alvenaria. Observa-se que elas estão divididas em normativas para tijolos e blocos de solo-cimento, ambos sem função estrutural. Para Mohamad, Machado e Jantsch (2017),

a alvenaria pode ser resumida como a construção de estruturas e paredes utilizando unidades unidas entre si por argamassa, e pode ser subdividida em alvenaria de vedação e alvenaria estrutural. Os tijolos e blocos de solo-cimento podem ser utilizados pela alvenaria de vedação que é feita para suportar apenas o seu próprio peso e as cargas de portas e janelas instaladas nela; o peso da construção é distribuído nos pilares, vigas, lajes e fundações. Já a alvenaria estrutural se caracteriza pelo uso de paredes como principal estrutura suporte da construção. Todavia não existem normas técnicas brasileiras que contemplem o uso destes tijolos ou blocos na alvenaria estrutural.

Quadro 3.1: Normativas brasileiras aplicáveis aos tijolos e blocos de solo-cimento

NBR	Título	Referência
8491	Tijolo de solo-cimento - Requisitos	NBR 8491 (ABNT, 2012)
8492	Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio	NBR 8492 (ABNT, 2012)
10834	Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos	NBR 10834 (ABNT, 2012)
10836	Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio	NBR 10836 (ABNT, 2013)
10833	Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento	NBR 10833 (ABNT, 2012)

A Figura 3.11, traz, da esquerda para a direita, a primeira prensa de tijolos de solo-cimento de que se tem registro, a Cinva-Ram, um exemplo de prensa manual e outro de prensa hidráulica. O que difere a Cinva-Ram dos equipamentos manuais atuais, são os moldes que podem ser fixos ou encaixáveis. Já as hidráulicas permitem uma maior força de prensagem, maior produção de tijolos em função do tempo e possibilidade de automação. Enquanto as manuais são comercializadas na faixa de R\$2000,00 –R\$10000,00, as hidráulicas podem ser encontradas entre R\$10000,00 – R\$ 80000,00⁹.

⁹ Preços encontrados no Google shopping para o território brasileiro em dezembro de 2020..

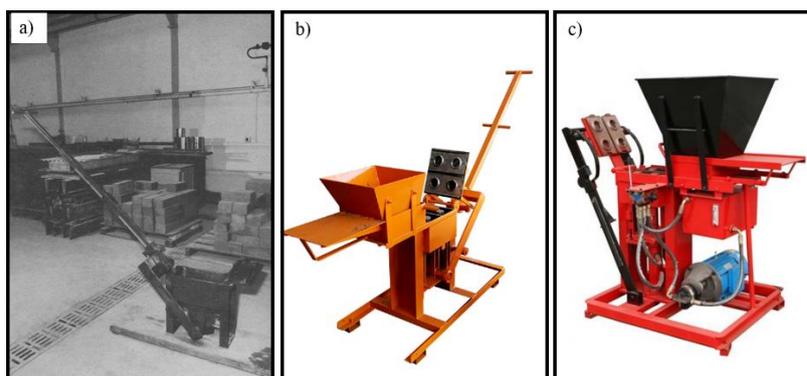


Figura 3.11: Exemplos de prensas de tijolos de solo cimento: a) Cinva-Ram, b) Prensa manual e c) Prensa hidráulica. Fonte: a) Rubiano e Caicedo (2008), b) Alibaba (2020), c) Alibaba (2020).

A Figura 3.12 traz uma sequência ilustrativa para a produção e uso desses tijolos. O solo precisa ser peneirado para a retirada de partículas grosseiras; depois, a mistura de solo, cimento e água é inserida no molde, que é prensada pelo equipamento escolhido. O tijolo é desenformado e passa por tempo de cura, para, então, ser utilizado em alvenaria.

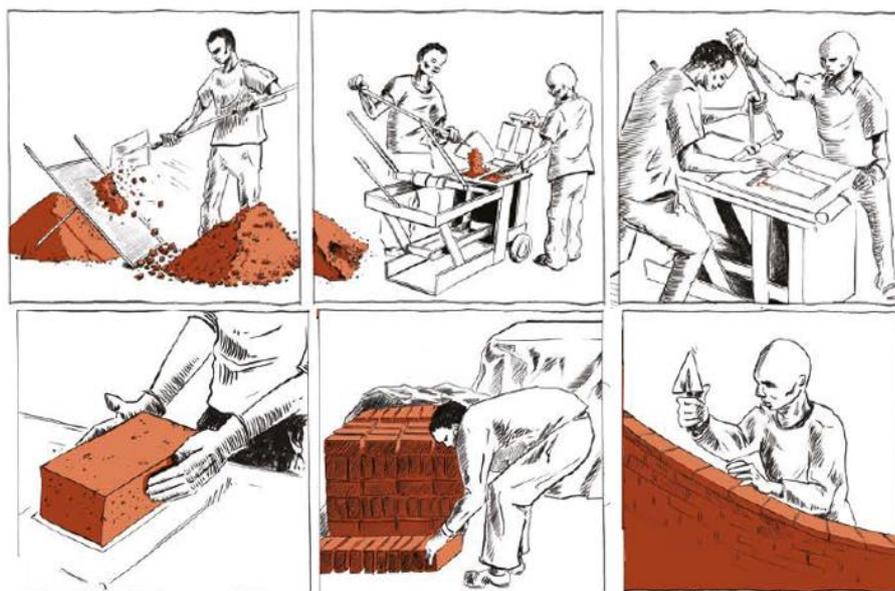


Figura 3.12: Sequência ilustrativa para a confecção e uso dos tijolos de solo-cimento. Fonte: Adaptado de Sémon e Gauzin-Muller (2015).

Ramos *et al.* (2015) apontam que o processo de assentamento das paredes com estes tijolos é similar ao da alvenaria convencional, sendo possível uni-los com junta argamassada ou seca, com um ou múltiplos planos. A ANITECO (2020) complementa que os tijolos de solo-cimento são de fácil encaixe e não necessitam, geralmente, de materiais extras tais como pregos, arames e madeiras e demandam uma menor quantidade

de cimento para o seu assentamento. Sobre os furos dos tijolos vazados, além de facilitarem o encaixe de uns nos outros, são utilizados para passar fiação e tubulações da residência sem a necessidade de quebrar as paredes, como ilustra a Figura 3.13.

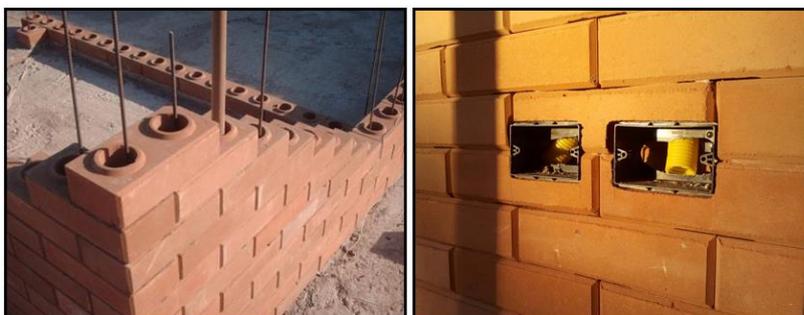


Figura 3.13: Detalhes da alvenaria com tijolos de solo-cimento sem argamassa de assentamento. Fonte: Adaptado de ANITECO (2020).

Por fim, trabalhos que discorram sobre as vantagens de se construir com esse eco material, bem como estudos que tratem do uso de resíduos industriais, incluindo os rejeitos de mineração na composição de tijolos de solo-cimento são cada vez mais frequentes, visto as suas vantagens ambientais, para a economia local e facilidade de operação (GRANDE, 2003; ROY, ADHIKARI e GUPTA 2007; ZHOU *et al.*, 2012; MOTTA *et al.*, 2014; MALATSE e NDLOVU, 2015; SÉMON e GAUZIN-MULLER, 2015; LIMA, 2017; NAGARAJ e SHREYASVI, 2017; VIEIRA, 2017; BEZERRA *et al.*, 2018; HALLAL, SADE e NAJJAR., 2018; REIS *et al.*, 2019; BARRETO, 2020; BARROS *et al.*, 2020; VILELA *et al.*, 2020, ANITECO, 2020.

3.5.1 Uso de rejeitos na produção de tijolos ecológicos

A possibilidade de incorporação de descartes diversos, tais como resíduos de construção civil, fibras vegetais, cinzas e lodos industriais na fabricação de tijolos ecológicos vem impulsionando as pesquisas nos últimos anos devido ao viés ambiental relacionado a essa prática. A incorporação de rejeitos de mineração nestes tijolos tem se mostrado promissora visto as quantidades expressivas de rejeitos gerados anualmente.

Como exemplos, Nagaraj e Shreyasvi (2017) avaliaram o desempenho de blocos de terra comprimida, BTCs, produzidos com rejeito do processamento de minérios de ferro, e areia, estabilizados com cimento e cal. A areia foi adicionada para correção granulométrica, visto que todo o rejeito apresentava tamanho inferior a 0,075mm. Foram obtidos os valores exigidos de resistência à compressão e absorção de água (propriedades mecânicas) estabelecidos por normas técnicas indianas; quanto maior a quantidade de estabilizante adicionada, mais satisfatórios foram os resultados obtidos. Já Zhou *et al.* (2012) utilizaram rejeito de minério de ferro, escória de alto forno e cimento Portland como materiais principais para a fabricação de tijolos tipo solo-cimento que atenderam às especificações dimensionais e mecânicas da China.

A norma técnica brasileira NBR 8491 (ABNT, 2012), que estabelece valores admissíveis de resistência à compressão (maior que 2,0MPa) e absorção de água (menor que 20%) foi atendida para tijolos de solo-cimento em estudos diversos:

- Vilela *et al.* (2020) fabricaram tijolos com rejeito de minério de ferro (adição de até 40%) e solo silte-argiloso estabilizados com cimento CPV-ARI no estado de Minas Gerais. O rejeito foi coletado em barragem da empresa Samarco e além das propriedades mecânicas, o comportamento térmico dos tijolos também foi investigado.
- Bezerra *et al.* (2018) avaliaram misturas de rejeito de minério de ferro e cinza de cavaco de eucalipto. Os resultados obtidos de resistência à compressão sugeriram que o material álcali ativado poderia ser utilizado como tijolos ou blocos prensados para alvenaria de vedação.
- Barros *et al.* (2020) desenvolveram tijolos ecológicos com resíduo de mineração de calcário (adição de até 90%) do Rio Grande do Norte e resina de poliéster estabilizados com peróxido de metiletilcetona (MEKP) em prensa manual. As matérias-primas passaram por análises de investigação química e testes de inflamabilidade. Ainda que a resina utilizada como matéria-prima apresentasse tendência a propagar chamas, a matéria inorgânica do rejeito atuou como inibidor de chamas no tijolo produzido.
- Vieira (2017) também avaliou a utilização de rejeito de pedreira como matéria prima na fabricação de tijolos. O rejeito (até 70%) de faixa arenosa (areia de britagem) foi mesclado a um solo argiloso no estado do Paraná e a mistura foi estabilizada com cimento Portland.
- Reis *et al.* (2019) avaliaram diferentes proporções de solo siltoso e quartzito (rejeito de rocha ornamental), coletados em Minas Gerais, estabilizados com cimento Portland.
- Barreto (2020) fabricou tijolos de solo-cimento utilizando resíduos de construção civil (RCC) e de rocha ornamental como matérias-primas. Além das caracterizações mecânicas, os tijolos também foram avaliados segundo o seu comportamento acústico e térmico. A adição de rejeito aumentou a porosidade dos tijolos, e, como consequência, melhorias dos desempenhos térmico e acústico foram observadas.

Ainda que pesquisas que abordem a incorporação de rejeitos de mineração na indústria civil sejam cada vez mais frequentes, poucas utilizam rejeito de mineração de ouro porque o seu processamento envolve o uso de substâncias nocivas, tais como mercúrio e cianeto, a depender da geologia da jazida e do processamento mineral utilizado.

Sobre o uso de rejeitos da mineração de ouro na fabricação de tijolos ecológicos, Roy, Adhikari e Gupta (2007) fabricaram tijolos que alcançaram as especificações indianas com a adição de 20% de cimento, o que tornou o processo economicamente inviável. Já Malatse e Ndlovu (2015) testaram diferentes misturas de rejeito, cimento (adição de até 50%) e água para a fabricação de tijolos; entretanto, nenhum deles alcançou as especificações de resistência à compressão da África do Sul. Em ambos os estudos os autores sugeriram avaliações químicas e ambientais para afirmar o uso potencial destes tijolos produzidos com rejeito de mineração de ouro.

Para todas as pesquisas citadas [Roy, Adhikari e Gupta (2007); Zhou *et al.* (2012); Malatse e Ndlovu (2015); Nagaraj e Shreyasvi (2017); Vieira (2017); Bezerra *et al.* (2018); Reis *et al.* (2019); Barreto (2020); Barros *et al.* (2020), e Vilela *et al.* (2020)], os parâmetros principais avaliados para os tijolos fabricados foram resistência à compressão e absorção de água (caracterização mecânica), como resume o Quadro 3.2. Contudo, segundo Zhang (2013), ademais desses indicadores, conhecer as características dos rejeitos é necessário, pois variações da composição química, mineralógica, granulométrica, assim como características de periculosidade são intrínsecos a cada rejeito e podem produzir tijolos com aspectos distintos

Quadro 3.2: Exemplos de estudos recentes que empregam rejeitos de mineração na produção de tijolos ecológicos

Referência	Matérias-primas dos tijolos	Estabilizante	Caracterização das matérias-primas	Caracterização dos tijolos
Vilela <i>et al.</i> (2020)	Rejeito de minério de ferro (até 40%) + solo silte argiloso	Cimento Portland CPV-ARI	Granulometria, massa específica, análise química e limites de consistência.	Mecânica NBR (8491) Térmica NBR (15220)
Barreto (2020)	Rejeito de rocha ornamental (até 20%) + resíduo de construção civil.	Cimento Portland CPII-Z-40	Granulometria, massa específica, análises química, de comportamento térmico e infravermelho.	Mecânica NBR (8491) Térmica NBR (15220) Acústica ISO 10140/10534
Barros <i>et al.</i> (2020)	Rejeito de calcário (até 90%) + resina de poliéster	MEKP	Granulometria, massa específica, análises química, de comportamento térmico e infravermelho.	Mecânica NBR (8491) Análises de comportamento térmico e infravermelho
Reis <i>et al.</i> (2019)	Rejeito de rocha ornamental (até 33%) + solo siltoso.	Cimento Portland CPII-Z-32	Granulometria, massa específica, e limites de consistência.	Mecânica NBR (8491)
Bezerra <i>et al.</i> (2018)	Rejeito de minério de ferro (até 40%) + cinza de cavaco de eucalipto.	---	Granulometria, química, de comportamento térmico e infravermelho.	Mecânica NBR 7215
Vieira (2017)	Rejeito de pedreira (até 70%) + solo argiloso.	Cimento Portland CPII-F-32	Granulometria e limites de consistência.	Mecânica NBR (8491)
Nagaraj e Shreyasvi (2017)	Rejeito de minério de ferro (até 50%) + areia	Cimento Portland + cal	Granulometria, química e massa específica	Mecânica (norma técnica Índia)
Malatse e Ndlovu (2015)	Rejeito de minério de ouro (100%).	Cimento Portland	Granulometria, química e de massa específica.	Mecânica) (norma técnica Africa do Sul)
Zhou <i>et al.</i> (2012)	Rejeito de minério de ferro (até 80%) + escória de alto forno.	Cimento Portland	Granulometria, química e de massa específica.	Mecânica (norma técnica da China)
Roy, Adhikari e Gupta (2007)	Rejeito de minério de ouro (100%).	Cimento Portland	Granulometria, química e de massa específica.	Mecânica (norma técnica Índia)

3.5.2 Estabilização dos tijolos de solo-cimento

Os estabilizantes aceitos pela NBR 8491 (ABNT, 2012) para a fabricação de tijolos de solo-cimento são os cimentos Portland, que, por sua vez, são definidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) como ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland com quantidades pré-estabelecidas de sulfato de cálcio e outras adições minerais.

O clínquer é constituído essencialmente de uma mistura de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados obtida pela fusão incipiente ($\approx 1450^{\circ}\text{C}$) de materiais cálcicos e silicosos previamente cominuídos, dosados e homogeneizados. As pelotas sinterizadas de clínquer (entre 5 e 25mm) são resfriadas ao sair do forno e moídas com a adição de até 5% de uma das formas de sulfato de cálcio, ou gesso, [gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), ou anidrita (CaSO_4)]. Esta adição objetiva controlar as reações iniciais de pega e endurecimento do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A maior parte do cimento Portland corresponde ao clínquer, que apresenta compostos de cálcio: silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Já a menor fração é constituída por óxidos de magnésio (MgO), de cálcio (CaO), alcalinos (Na_2O e K_2O) e sulfatos (SO_4). Estes compostos são comumente abreviados, como ilustra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Abreviação dos óxidos do clínquer

Óxido	Abreviação do óxido	Composto	Abreviação do composto
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
SO_3	Ŝ	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

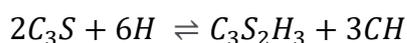
Segundo o Conselho Administrativo de Defesa Econômica, CADE (2019), o Brasil dispõe de oito tipos básicos normalizados de cimento Portland que possuem subtipos e classes de resistência, somando mais de vinte tipos de cimentos comercializados para variadas aplicações. O cimento Portland Comum (CPI), embora seja praticamente ausente no mercado nacional, é o cimento Portland referência devido as suas características químicas e propriedades de resistência. O CPI –S é um subtipo do cimento Comum pois contém adição de até 5% de material pozolânico, escória ou fíler calcário. O cimento Portland Composto (CPII) pode ser formado por escória (CPII-E), pozolana (CPII-Z), ou fíler (CPII-F), mas com proporções maiores desses aditivos do que o CPI-S. Já os

cimentos Portland de Alto - Forno (CPIII) e Pozolânico (CPIV) contam com um percentual ainda maior de escória e pozolana. O cimento de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) contém de 95 – 100% de clínquer e gesso na sua composição. O Quadro 3.3 contém os tipos de cimento (CP I, II, III, IV e V-ARI) com nomenclaturas, componentes em massa e teores de óxidos exigidos por norma, sendo estes os mais utilizados no país. Também podem ser encontrados no mercado nacional outros cimentos especiais como o cimento Resistente a Sulfatos (RS), de Baixo Calor de Hidratação (BC) e cimento Portland Branco (CPB), voltados para aplicações específicas.

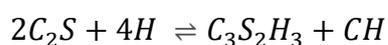
Para a fabricação dos tijolos de solo-cimento, além das matérias-primas também é adicionada água, que fornece à mistura as propriedades reológicas exigidas (trabalhabilidade) e promove a hidratação do cimento por reações simultâneas dos compostos anidros com a água. A hidratação do cimento é responsável pelo endurecimento e desenvolvimento da resistência adquirida pelo componente de alvenaria.

Os silicatos presentes na composição do cimento, silicato tricálcico e silicato dicálcico, ou C_3S e C_2S (Tabela 3.7), são instáveis devido a presença de CaO e reagem com água formando as fases de silicato de cálcio hidratado, ou fases C-S-H. As Equações 3.4 e 3.5 representam essa reação com o C_3S e o C_2S , nessa ordem, em que o composto $C_3S_2H_3$ é uma fase C-S-H, e o CH é um hidróxido de cálcio.

(3.4)



(3.5)



A fase C-S-H compõe de 50-60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada, e, dessa forma, determina as suas propriedades mecânicas. O termo C-S-H é expresso por hífen porque não tem uma fórmula química bem definida; a própria relação C/S varia entre 1,5 a 2,0 bem como a quantidade de água estrutural. A morfologia das fases C-S-H também assume diversas microestruturas, desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quadro 3.3: Tipos de cimento Portland normatizados no Brasil

Nome técnico do Cimento Portland	Sigla	Classe de resistência	Conteúdo dos componentes				Teores de óxidos		
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário	MgO	SO ₃	CO ₂
Comum	CPI	25, 32, 40	100 - 95	0 - 5			≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 3,0
Comum com adição	CPI-S	25, 32, 40	94 - 90	1 - 5			≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 5,5
Composto com escória	CPII-E	25, 32, 40	94 - 51	6 - 34	0	0 - 15	-	≤ 4,5	≤ 7,5
Composto com pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94 - 71	0	6 - 14	0 - 15	-	≤ 4,5	≤ 11,5
Composto com fíler	CPII-F	25, 32, 40	89 - 75	0	0	11 - 25	-	≤ 4,5	≤ 7,5
Alto-forno	CPIII	25, 32, 40	65 - 25	35 - 75	0	0 - 10	-	≤ 4,5	≤ 5,5
Pozolânico	CPIV	25, 32	85 - 45	0	15 - 50	0 - 10	-	≤ 4,5	≤ 5,5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100 - 90	0	0	0 - 10	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 5,5

Fonte: Adaptado de NBR 16697, ABNT (2018).

A hidratação dos aluminatos presentes na composição do cimento (C_3A , C_4AF e C_4A_3S) sem o gesso, é uma reação rápida, exotérmica, com grande liberação de calor, e que forma hidratos cristalinos responsáveis pela pega; por isso o sulfato de cálcio é adicionado na composição dos Portland. A Equação 3.6 representa a hidratação dos aluminatos com a adição de gesso formando a fase de hidratação do cimento C-A-S-H ($C_6AS_3H_{32}$), que, da mesma forma que a fase C-S-H pode assumir distintas morfologias e composições químicas.

(3.6)



Mehta e Monteiro (2014) propuseram um diagrama que representa as zonas de transição da hidratação e da matriz cimentícia (já hidratada) do concreto como ilustra a Figura 3.14. Os autores observam que ambas as zonas são heterogêneas, em que vários minerais podem estar contidos, além da distribuição e quantidade de microfissuras, poros, vazios e fases sólidas irregulares. Espera-se que os produtos de hidratação do cimento, C-A-S-H, CH, e C-S-H possuam morfologia acicular, maciça e hexagonal, e pouco cristalina e fibrosa, nessa ordem. Entretanto, uma vez que as fases C-A-S-H e C-S-H podem representar diferentes compostos, distintas morfologias podem ser observadas.

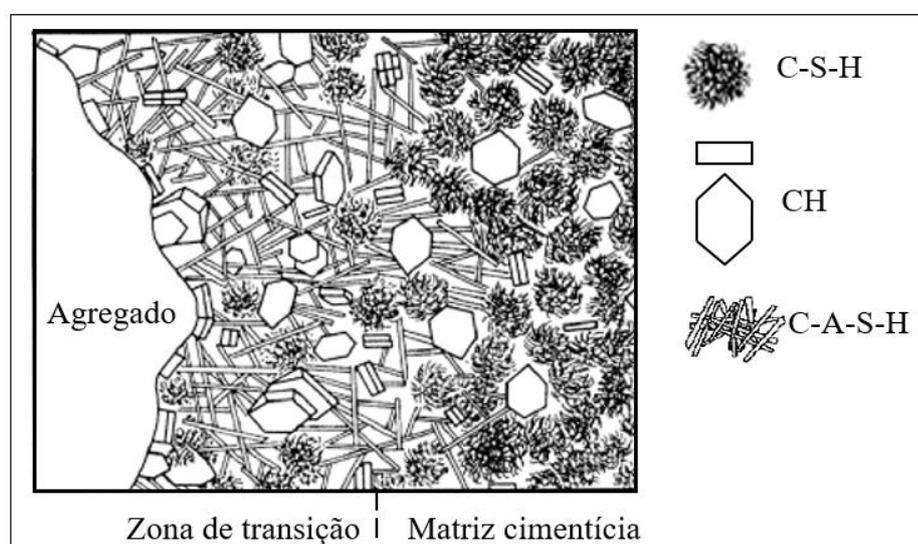


Figura 3.14: Representação diagramática da zona de transição e da matriz cimentícia da pasta de cimento no concreto. Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

As reações de hidratação do Cimento Portland são exotérmicas e a quantidade de calor liberada por essa reação é chamada de calor de hidratação. Quanto maior o teor de C_3S e C_3A , maior o calor de hidratação do cimento, favorecida também pela menor granulometria. Quando em contato com a água, cerca de 50% do calor potencial é liberado nos três primeiros dias, e 90% no primeiro mês de hidratação. Por isso é usual que tijolos

de solo-cimento passem por cura mínima de 28 dias, tempo necessário para que as reações de hidratação do cimento ocorram, dando resistência mecânica às misturas.

O Quadro 3.4 ilustra a resistência mecânica adquirida pelos tipos de cimento Portland em função do tempo. Observa-se que se o cimento utilizado for o CPV-ARI, o tempo de cura é mais curto, a hidratação do cimento ocorre de forma mais rápida. Entretanto, este é um cimento de valor mais oneroso e não é encontrado com a mesma facilidade que o CII em todo o território nacional (CADE, 2019).

Quadro 3.4: Resistência mecânica dos cimentos Portland em função do tempo

Cimento Portland		Resistência à compressão (MPa) em função do tempo				
Tipo	Classe	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CPI (comum ou CPI-S)	25		≥ 8	≥ 15	≥ 25	
	32	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40		≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CPII (E, Z ou F)	25		≥ 8	≥ 15	≥ 25	
	32	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40		≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CPIII	25		≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40
	40		≥ 12	≥ 23	≥ 40	≥ 48
CPIV	25		≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40
CPV-ARI		≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	-

Fonte: Adaptado de CADE (2019).

3.6. Caracterização de rejeitos de mineração

Caracterizar significa investigar as características de uma determinada amostra. Em tecnologia mineral a caracterização faz-se necessária porque em uma determinada jazida ocorrem variações da composição mineralógica (distribuição não regular do mineral-minério), na granulometria, na competência e no teor do elemento de interesse (LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

A identificação destas características específicas norteia os métodos de concentração mais indicados para o beneficiamento de minérios, uma vez que investiga o grau de liberação e a propriedade diferenciadora entre o mineral de interesse e os de ganga (LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

Quando esta investigação objetiva uma proposta de rota de processamento mineral, a caracterização é dita tecnológica. Entretanto, nem sempre essa rota é alcançada ou viável, o que acontece, por exemplo, na caracterização de algumas barragens e pilhas de rejeito, devido, principalmente, ao baixo teor do mineral-minério disposto.

Ainda que o presente trabalho aposte na caracterização de rejeitos de mineração como alternativa para a alta geração de resíduos gerados (constituindo o principal impacto ambiental desta atividade) como forma de se tornar mais sustentável; caracterizar uma barragem ou pilha de rejeito não é tarefa tão simples. Em muitos empreendimentos estas estruturas armazenam material ao longo do tempo, expostos a intempéries, de distintas frentes de lavra, heterogêneo, com o material já segregado devido ao tamanho e massa específica de cada grão.

3.6.1 Amostragem

A amostragem surge, então, como um processo de extrema importância para a caracterização de minérios por abranger uma sequência de operações que objetiva a obtenção de alíquotas, ou amostras que sejam representativas do todo trabalhado. Pode-se dizer que uma decisão obtida através de caracterização é tão boa quanto a amostra na qual ela se baseia.

Para Chaves e Ferreira (2012), quando a massa a ser amostrada é grande (toneladas), ela deve ser feita por incrementos através da formação de pilhas longas onde uma amostra incremental deve ser retirada em intervalos de tempos ou percursos iguais e juntada aos demais incrementos. O montante deve ser então homogeneizado e reduzido.

Outro método possível é por fracionamento, onde, a partir de uma pilha cônica, se divide a amostra total em duas amostras reduzidas, e cada uma destas partes podem ser divididas em outras duas, e assim sucessivamente (CHAVES e FERREIRA, 2012).

Ainda que feita criteriosamente, a representatividade de uma população pode ser prejudicada por vários erros de operação, operador, e heterogeneidade das partículas do sistema, dentre os quais, para o presente trabalho, se destacam dois, o erro fundamental de amostragem e o efeito pepita (CHAVES e FERREIRA, 2012).

O primeiro só pode ser eliminado se a amostra for todo o universo amostrado; caso contrário sempre haverá diferenças entre parâmetros da amostra tomada e os mesmos parâmetros do total estudado. Dessa forma, mesmo que exista uma massa mínima, com um erro máximo admissível, que seja capaz de representar todo o universo estatisticamente, se ela não for igual ao total, haverá o erro fundamental de amostragem (LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

O efeito pepita é um termo geoestatístico que descreve a proporção de variabilidade aleatória presente na amostragem de materiais heterogêneos. Depósitos de metais preciosos, como o ouro, por exemplo, onde a concentração do mineral-minério está na faixa de ppm, apresentam um efeito pepita elevado, uma vez que a reprodutibilidade das amostras é muito baixa. A amostragem nestes depósitos exige alta acurácia, sendo um grande desafio para a indústria mineral. Somado a tal dificuldade, o ouro, de maior interesse para este trabalho, devido a sua alta densidade, sofre uma forte segregação

quando liberado. Assim, quanto menor o teor do metal de interesse na amostra mãe, maior a dificuldade de se obter amostras representativas (LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

A Figura 3.15 ilustra o efeito pepita. Nela, um bloco inicial, A, de 1m^3 de minério é composto majoritariamente por areia (ganga) e por uma pepita de ouro no canto inferior direito de 10g . O teor do bloco A é, portanto, de 10g Au/m^3 . Entretanto, se a amostragem feita englobar o bloco B (metade do volume de A), a caracterização apontará um teor de 20g Au/m^3 . De modo análogo, se o bloco amostrado for o C (metade do volume de B), o teor do minério será de 40g Au/m^3 , salientando a importância da amostragem em depósitos onde possa ocorrer o efeito pepita.

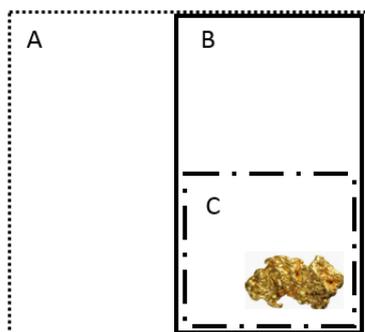


Figura 3.15: Efeito pepita.

3.6.2 Caracterização física

A determinação da massa específica por picnometria a gás é indicada devido ao fato desta técnica conseguir determinar o volume real das partículas minerais, ainda que estas sejam porosas. O hélio é amplamente utilizado por ser inerte e pelo pequeno tamanho dos seus átomos que conseguem penetrar estes poros quando existentes, sendo mais eficaz que a picnometria comum. Para a análise, o processo de desgaseificação da amostra remove impurezas e umidade existentes. Após esta limpeza, todo o sistema é levado a pressão atmosférica; o porta-amostras contendo a amostra é pressurizado até uma pressão P_1 (conhecida), e posteriormente alivia-se essa pressão, sendo uma pressão mais baixa P_2 (medida) (QUANTACHROME, 2019). O volume da amostra é obtido através da Equação 3.7.

(3.7)

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1}$$

Onde V_s é a massa específica/massa volúmica da amostra mineral, V_a é o volume do recipiente da amostra, V_e o volume da câmara de expansão, P_1 a pressão 1 e P_2 a pressão 2.

A distribuição dos tamanhos de amostras minerais é tipicamente conduzida por peneiramento. Para tal, a série de peneiras Tyler é amplamente utilizada no Brasil. Para a caracterização granulométrica de minérios finos a classificação em cyclosier é utilizada (WILLS e NAPIER – MUNN, 2006; LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

Ao aproveitar resíduos de mineração na indústria civil, a NBR 6502 (ABNT, 1995) classifica as partículas segundo a sua granulometria em pedregulho, areia grossa, média e fina e argila. São denominadas argilas as partículas menores que $2\mu\text{m}$; dessa forma, quando se deseja conhecer essa fração, a NBR 7181 (ABNT, 2016), que combina peneiramento (como o descrito anteriormente) e sedimentação é indicada para a análise de distribuição de tamanhos.

Também como parte da caracterização física, a área superficial específica (ASE) de uma amostra mineral é útil na avaliação do consumo de reagentes na concentração (quando aplicável). Uma grande quantidade de poros pode inferir em uma grande absorção de água para o caso específico de tijolos construídos com esse material.

A ASE de uma partícula sólida pode ser mensurada através da adsorção de um gás na sua superfície. Dessa forma, as isotermas de adsorção são curvas que indicam a quantidade de gás adsorvido em uma superfície devido à variação de pressão sofrida. Dentre os modelos teóricos que interpretam ou predizem tais isotermas, o de Brunauer, Emmett e Teller, ou BET, se destaca (LOWELL e SHIELDS, 1991).

A isoterma que segue o modelo BET apresenta no eixo das abcissas a pressão relativa, ou, diferença de pressão (p/p_0); e nas ordenadas o volume de gás adsorvido (V/V_0) - cm^3/g nas CNTP), onde V_0 é a massa de gás adsorvido na pressão relativa (p/p_0). O nitrogênio, gás amplamente utilizado para o estudo de ASE (devido ao pequeno tamanho das suas moléculas – diâmetro = $0,454\text{nm}$), em temperatura muito próxima de seu ponto de liquefação, se condensa no interior de poros pequenos ($<100\text{nm}$) antes da liquefação ocorrer na superfície externa e no interior de poros maiores. Dessa forma, a dessorção (caminho inverso da adsorção) apresenta uma certa inflexão na curva apresentada na isoterma, chamada de histerese, que indica a presença de poros na amostra avaliada (LOWELL e SHIELDS, 1991). O modelo de BJH (Barret, Joyner e Halenda) é bastante utilizado na análise de porosimetria. O método consiste na avaliação dos raios das histereses apresentadas na isoterma durante a dessorção para a quantificação e dimensionamento dos poros existentes (LOWELL e SHIELDS, 1991).

3.6.3 Caracterização química, mineralógica e morfológica

Dentre as técnicas de identificação mineralógica, a difratometria de raios-X, ou, DRX, é uma técnica analítica comumente utilizada para a identificação de fases minerais majoritárias de uma amostra, preferencialmente cristalinas.

Os raios-X são ondas eletromagnéticas de comprimento de onda, λ , entre 10^{-2} - 10^2Å que podem ser polarizadas, refletidas e difratadas. A análise de DRX consiste em um equipamento (difratômetro) que produz os raios-X através do bombardeio do anodo por elétrons do catodo acelerados por uma alta diferença de potencial. Este feixe de onda eletromagnética incide na amostra que está sendo investigada, é difratado em cada plano cristalino da mesma, provocando uma interferência construtiva que é detectada pelo

equipamento que a transforma em um sinal eletrônico que será registrado graficamente (CULLITY e STOCK, 2001).

Dessa forma, a difração de raios-X pode ser resumida como processo em que os raios-X são espalhados pelos elétrons dos átomos do cristal investigado (sem mudança do comprimento de onda). A difração ocorre quando a lei de Bragg exposta na Equação 3.8 é obedecida.

(3.8)

$$n\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$$

Onde λ é o comprimento de onda dos raios-X incidentes (Å), d é o espaçamento interplanar (Å), θ é o ângulo de difração (graus) e n é um múltiplo inteiro do comprimento de onda.

O difratograma de raios-X em forma de picos onde o eixo das abcissas contém o dobro do ângulo de difração, ou varredura, 2θ , e na ordenada tem-se a intensidade dos raios difratados. Através de bancos de dados é possível identificar qual o provável mineral ou substância corresponde ao par intensidade x 2θ .

Da mesma forma que o DRX, a espectrometria de fluorescência de raios X, ou FRX, é uma técnica não destrutiva bastante utilizada, porém, esta identifica os elementos químicos presentes em uma amostra através de seu número atômico. Ao incidir um feixe de raios-X em uma determinada amostra é possível induzir transações eletrônicas entre os orbitais mais internos dos átomos que podem resultar em emissões de radiação de energia, ou fluorescência de raios-X, característica que permite a identificação do elemento atômico (CULLITY e STOCK, 2001).

Ainda que a DRX e a FRX sejam técnicas comuns para a caracterização de minérios, pelo fato do ouro vir em pequena fração em massa em jazidas minerais, estas técnicas podem não identificar o elemento em uma determinada amostra. Neste contexto, o Fire Assay (AAF), ou teste de fusão e copelação, é considerado a técnica mais eficiente de análise de ouro, também amplamente utilizado para elementos do grupo platina e consiste na extração dos metais preciosos através de uma fusão coletora com chumbo. O método destrutivo pode ser subdividido em três etapas: fusão, extração de materiais preciosos e análise e detecção (SGS GEOSOL, 2020).

Na primeira etapa, uma massa conhecida da amostra pulverizada é misturada a um agente de escorificação (agente redutor) e a óxido de chumbo (coletor) e é então aquecida em fornalha até a sua fusão. As funções do agente de escorificação são tornar a amostra mais fluida e reagir com os silicatos presentes na amostra, formando a chamada escória. Durante o processo de fusão, o agente redutor promove a transformação do óxido de chumbo em chumbo metálico, que juntamente aos metais preciosos, serão separados da escória de silicato, sendo direcionados para o fundo do cadinho. Assim, após o resfriamento é possível separar a fase metálica da escória (CORBY, 2018).

A segunda fase objetiva a separação do chumbo do material valioso por meio de um processo chamado copelação. Para tal, o chumbo é fundido em uma copela (pequeno cadinho de argila refratária utilizado no processo de copelação), transformado em óxido

de chumbo (através da ação da temperatura e do oxigênio atmosférico) e é absorvido pelo aparato. No final do processo, os metais valiosos estarão separados do chumbo, na forma de um pequeno grânulo chamado pérola (CORBY, 2018).

Por último, a terceira fase almeja a detecção do metal valioso contido na pérola que pode ser analisado por alguns métodos (Absorção atômica de chama, Espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado, Análise instrumental por ativação com nêutrons), dentre os quais se destaca Espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES – em inglês *Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry*).

A tecnologia ICP- OES se baseia na introdução de uma solução da amostra investigada no plasma, onde ocorre a evaporação do solvente, depois, a formação de partículas sólidas, a fusão e dissociação das mesmas de forma que átomos e íons livres estejam presentes no sistema.

O Plasma (ICP) é um gás parcialmente ionizado cujas propriedades dependem significativamente da ionização, sendo mantido por uma fonte de energia externa (energia do plasma é fornecida por uma fonte de radiofrequência de 27 - 40MHz). O mesmo atua como fonte de atomização, ionização e excitação. O estado excitado é instável, dessa forma, átomos e íons perdem energia pela colisão com outras partículas ou pela transição para um nível de radiação menos energético. Assim, a técnica analítica ICP- OES se baseia na medida da emissão de radiação eletromagnética das regiões visível e ultravioleta do espectro eletromagnético por átomos neutros ou átomos ionizados excitados. Dessa forma, é possível selecionar os elementos de acordo com suas ondas eletromagnéticas (comprimentos de onda variam de 160nm a 900nm), e separá-los de acordo com a quantidade presente em cada amostra, não havendo restrições para o número de elementos (SKOOG, HOLLER e NIEMAN, 2006).

Já a espectrometria de absorção atômica (AAS – em inglês *Atomic Absorption Spectrometry*) constitui outra técnica analítica para quantificação de elementos químicos, indicada para medir pequenas concentrações de elementos químicos em água. A AAS será utilizada neste trabalho juntamente a análise ambiental que será abordada no decorrer do texto.

Essa técnica se fundamenta na medida de intensidade da absorção da radiação eletromagnética de uma amostra quando uma fonte de radiação primária incide sobre ela. Esta fonte é uma chama fortemente oxidante (acetileno C_2H_2 ou óxido nitroso N_2O) que é injetada em um queimador juntamente com o ar promovendo a dessolvatação da amostra (que está no estado líquido), a quebra das ligações químicas entre os átomos constituintes das moléculas e atomização da amostra envolvendo radicais da chama. Um feixe de luz gerado por uma lâmpada (catodo tem a mesma composição do analito) é focalizado para a chama que excita o átomo, causando transições de elétron nos orbitais. A diferença entre a radiação recebida pelo detector, visto a lâmpada e a amostra, será proporcional à quantidade do elemento na amostra (SKOOG, HOLLER e NIEMAN, 2006).

Como forma complementar as análises químicas e mineralógicas realizadas, os microscópios eletrônicos têm o objetivo de observar os aspectos morfológicos dos minerais presentes na amostra investigada com grande aumento e resolução espacial. O microscópio eletrônico de varredura, MEV, acelera um feixe de elétrons através de uma alta diferença de potencial que é dirigido para lentes eletromagnéticas que o convergem

para a superfície da amostra. Os sinais emitidos pela amostra são amplificados afim de formar imagens em um tubo de raios catódicos. Quando associado a espectrometria de energia dispersiva, EDS, pode-se realizar a microanálise e identificar os elementos químicos presentes em uma microrregião a partir da detecção dos raios $-X$ que são gerados na amostra após a incidência do feixe de elétrons (SKOOG, HOLLER e NIEMAN, 2006).

a) Técnicas auxiliares

Técnicas auxiliares, tais como as análises térmica e de infravermelho, podem ser utilizadas para a obtenção de informações complementares as análises de DRX e FRX, permitindo, em certos casos, melhores identificações nos minerais de baixa cristalinidade, com altos índices de substituições no retículo, ou materiais amorfos (LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

A análise térmica constitui um grupo de técnicas utilizadas para medir as transformações das propriedades físicas de um material quando submetido a uma variação controlada de temperatura e sob uma atmosfera específica. Dentre elas estão a análise térmica diferencial (DTA) e a análise termogravimétrica (TGA) que são as mais aplicadas pela mineralogia aplicada (DUVAL, 1963; LUZ, FRANÇA e BRAGA, 2018).

Na análise térmica diferencial (DTA) são investigadas as diferenças de temperatura entre o material que se deseja caracterizar e um padrão (material de referência inerte). Ambos são sujeitos a idênticos regimes de diferença de temperatura que geram efeitos nas amostras. Tais efeitos fornecem informações a respeito das reações endotérmicas e exotérmicas atribuídas aos processos de oxidação, desidratação, decomposição e inversão de cristalinidade dos materiais quando aquecidos. Estas informações, podem ser típicas de um determinado material, o que possibilita a sua identificação. Dessa forma, plota-se um gráfico que relaciona o fluxo de calor obtido em função da diferença de temperatura. Os picos obtidos podem caracterizar reações exo ou endotérmicas específicas para um dado material (DUVAL, 1963).

Já a análise termogravimétrica (TGA) monitora as variações de massa (perda ou ganho) da amostra que se deseja investigar em função de um aquecimento constante e atmosfera controlada. Esta técnica permite analisar os intervalos de temperatura em que ocorrem reações químicas específicas que ocasionam modificações de massa no material. Esta perda de massa pode ser consequência da remoção de misturas adsorvidas, grupos hidroxilas ou substâncias voláteis. Já o ganho de peso é atribuído ao processo de oxidação. A gama de minerais que podem ser estudados por esta técnica está limitada aos argilominerais e àqueles que contem água, enxofre, hidroxila, matéria orgânica e carbonatos. Os dados obtidos de porcentagem de perda de massa e variação da temperatura permitem a construção das curvas termogravimétricas (DUVAL, 1963).

A espectrometria no infravermelho é uma técnica que fornece dados sobre a identidade e constituição estrutural de um composto puro ou sobre a composição de misturas. O método utilizado para obtenção de espectros no infravermelho dos materiais sólidos é o da pastilha com brometo de potássio prensada. Um espectro de infravermelho compõe-se de bandas de absorção intrinsecamente relacionadas aos movimentos moleculares (principalmente vibrações). Assim, ademais dos compostos orgânicos, os minerais mais

facilmente caracterizados pelos seus espectros de infravermelho são aqueles que contém oxianions (ânions poliatômicos contendo oxigênio) isolados, tais como os carbonatos, os sulfatos e os fosfatos. Já os espectros dos oxianions condensados (silicatos em maioria) geralmente apresentam-se sob formas complexas; dentre os silicatos, os minerais contendo o grupo hidroxila (argilominerais, por exemplo) mostram vibrações características de alta intensidade (PAVIA *et al.*, 2010; LUZ FRANÇA e BRAGA, 2018).

3.6.4 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental, ou de periculosidade, de resíduos de mineração é de extrema importância pois estes passam por processos de beneficiamento e metalurgia específicos com distintos reagentes, conferindo, a cada um, características únicas.

A periculosidade de rejeito de minério está normatizada pela NBR 10004 (ABNT, 2004) que classifica os resíduos sólidos por meio de ensaios de lixiviação pela NBR 10005 (ABNT, 2004) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004).

Para as normativas, a lixiviação pode ser conceituada como sendo a extração de elemento ou moléculas orgânicas ou inorgânicas contidas ou fixadas em uma matriz sólida, por via úmida, sob ação de mecanismos químicos ou biológicos; ou ainda, a operação cujo objetivo é a separação de substâncias específicas em sólidos através de lavagem e percolação de água. Já a solubilização pode ser entendida como operação que tem o objetivo de dissolver substâncias contidas nos resíduos, por meio de lavagem em meio aquoso. Os extratos lixiviado e solubilizado têm os seus elementos químicos analisados por Espectrometria de absorção atômica (AAS).

Quando estas operações almejam a obtenção de informações sobre o material estudado em meio de ensaio a curto e a médio prazo ela é dita teste de caracterização de base, onde a relação líquido/sólido, duração de vida do material, composição química do agente lixiviante, fatores que controlam a lixiviação e a solubilização são parâmetros que devem ser observados. Esta caracterização avalia parâmetros ambientais dos resíduos sólidos em relação aos seus impactos ambientais e estabilidade química quando em contato com soluções aquosas, ou chuva, ao pensar em condições naturais (CAUDURO, 2003).

3.6.5 Caracterização geotécnica

A geotecnia pode ser interpretada como aplicação de métodos científicos para aquisição, interpretação e uso de materiais da crosta terrestre no uso da ciência. Analogamente, a caracterização geotécnica objetiva investigar o comportamento destes materiais no seu uso em engenharia (HOLTZ e KOVACS, 2010).

Dentre os fatores diretamente correlacionados ao comportamento dos solos está a quantidade de água contida nele, de forma que o solo pode ter a consistência líquida, plástica, semi-sólida e sólida. O primeiro estado não possui resistência ao cisalhamento, e como o próprio nome diz, o solo assume a aparência de um líquido. Com a perda de umidade o solo passa a sofrer deformação em função da variação volumétrica, e passa a apresentar um comportamento plástico. Com a maior perda de água, o material assume a consistência semi-sólida de característica quebradiça até o ponto em que o mesmo não

sofre mais variações volumétricas com a sua secagem, assumindo caráter sólido (HOLTZ e KOVACS, 2010).

Os Limites de Consistência ou Limites de Atterberg são, então, parâmetros regidos pela ABNT que indicam o comportamento de um material segundo a quantidade de água contida nele. Dentre eles, a determinação do Limite de Liquidez, *LL*, é normatizado pela NBR 6459 (ABNT, 2016) onde cerca de 200g de material (passante em 0,42mm, destorroado e homogeneizado) é disposto em prato do aparelho Casagrande com uma ranhura padrão de 1cm (divide a massa ao meio). O equipamento possui uma manivela que move o prato através de golpes. O teste consiste em variar a umidade do material e golpeá-lo inúmeras vezes. O *LL* corresponde ao teor de umidade no qual essa abertura se fecha com 25 golpes.

Já o Limite de plasticidade, *LP*, diz respeito a plasticidade, ou quão moldável, um material é. No estado plástico, o solo perde a capacidade de fluir e conserva a sua forma, podendo ser moldado. Entretanto, se a perda de umidade for contínua, essa facilidade desaparece. O *LP* indica o ponto em que o material assume a consistência semi-sólida. A NBR 7180 (ABNT, 2016) regulamenta o teor de umidade para o qual o solo começa a apresentar fraturas quando moldado em forma cilíndrica com 3mm de diâmetro e rolado em uma placa de vidro fosco.

Por fim, o Índice de plasticidade, *IP*, combina os resultados de *LL* e *LP* com o intuito de representar a quantidade de água necessária para que um material se torne mais plástico.

A NBR 12023 (ABNT, 2012) norteia o ensaio de compactação de solo-cimento, prescrevendo o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca quando compactados. Assim, o ensaio de compactação Proctor investiga a quantidade de água que deve ser adicionada em um solo, de forma a ocupar os espaços vazios entre os grãos, e que a massa formada, quando seca, alcance a maior massa específica aparente.

3.6.6 Caracterização dos tijolos de solo-cimento

Uma vez realizada a caracterização do rejeito, através da análise dos resultados obtidos, determinam-se os parâmetros para a fabricação do tijolo de solo-cimento (teores de cimento, água, rejeito e solo). Este tijolo, para que possa ser comercializado, deve obedecer a NBR 8491 (ABNT, 2012) que determina as dimensões, a resistência à compressão e absorção d'água desses componentes de alvenaria.

Sobre a análise dimensional, o comprimento (*c*) corresponde a maior dimensão das faces de assentamento, a largura (*l*), a menor dimensão, enquanto a altura (*h*) é a distância entre elas. A NBR 8491 (ABNT, 2012) classifica os dois tipos principais de tijolos tipo solo-cimento, A e B, representados na Tabela 3.5, mas assume que outras dimensões sejam aceitas, desde que o tijolo permaneça com a altura menor que a sua largura.

A resistência à compressão pode ser entendida como medida da resistência suportada por um objeto, ou superfície, aos esforços de compressão que são aplicados nela. Estes esforços são a resultante de uma força que comprime um material de modo a reduzir uma das suas dimensões. Inicialmente, o corpo sofre uma deformação elástica, entretanto, ao atingir a tensão de escoamento, a deformação passará a ser plástica, o que implica em

uma deformação permanente. Já a absorção de água pode ser interpretada como uma medida de porosidade do objeto testado. A diferença entre o peso da amostra molhada e seca, fornece o seu grau de absorção.

A NBR 8491 (ABNT, 2012) é a normativa que estabelece os requisitos para que um tijolo seja classificado como tipo solo-cimento no Brasil. Entretanto, no presente trabalho também são realizadas caracterizações de durabilidade, térmica, química, mineralógica, morfológica e ambiental dos tijolos, visto que eles foram produzidos com rejeito de mineração de ouro, até então, nunca caracterizado, inovação do estudo.

Segundo Souza (2011) ensaios de durabilidade indicam a capacidade de um material em se conservar um determinado estado e manter suas características ao longo do tempo. A NBR 13554 (ABNT, 2012) estabelece uma metodologia para investigação da durabilidade de solo-cimento através do cálculo da perda de massa de corpos de prova após ciclos de molhagem e secagem. Quanto menor a variação de massa, mais durável é o material.

Para Fayçal *et al.* (2016), González-López *et al.* (2018) e Cordeiro *et al.* (2020) o solo, quando utilizado na construção civil, deve ser investigado não só pelas suas características físicas e geotécnicas, mas também pelo seu conforto térmico. Neste contexto, a NBR 15220 (ABNT, 2005) e a NBR 15575 (ABNT, 2013) são as normas de desempenho térmico que vigoram, atualmente, no Brasil, e estabelecem valores admissíveis para parâmetros térmicos, segundo as zonas bioclimáticas brasileiras (Z), para elementos e componentes de edificações.

Sobre estas, o território brasileiro tem seu clima mapeado, dividido em 8 zonas bioclimáticas. As zonas tem relação com as características climáticas das diversas áreas do território, que não obedecem ao mapeamento político ou divisão em estados ou regiões econômicas. Os estudos bioclimáticos de cada cidade permitem relacioná-los a tabelas que indicam as estratégias e diretrizes construtivas recomendadas para cada local zona bioclimática brasileira. A Figura 3.16 ilustra o mapa bioclimático do país em que a legenda contém a porcentagem do território brasileiro para cada zona.

A caracterização térmica de um permite verificar se os parâmetros encontrados se adequam nas faixas de valores máximos e/ou mínimos estabelecidos para cada zona bioclimática brasileira.

Assim, na caracterização térmica de materiais, determina-se a absorvância à radiação solar (α), definida como o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície, pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Este parâmetro é um valor adimensional que varia entre 0 e 100%, e, quanto maior este número, maior a absorção de radiação solar, ou maior a troca térmica entre as faces de um determinado material (DORNELLES e RORIZ, 2006).

Para Rasooli e Itard (2018), a transmitância térmica (U) pode ser considerada a variável mais importante para avaliação do comportamento térmico de uma estrutura e/ou material quando submetido à transmissão de calor. Para compreensão deste conceito, ao dividir 1m^2 da envoltória de um corpo qualquer pela diferença de temperatura entre suas faces, o valor obtido corresponde à transmitância térmica que pode ser entendida como o nível de isolamento térmico em relação à porcentagem de energia que atravessa a envoltória. Se o valor obtido for baixo, a superfície é dita bem isolada. Este parâmetro é inversamente

proporcional a resistência térmica (R_T). Dessa forma, o princípio básico para a obtenção da transmitância térmica consiste em submeter uma superfície a um fluxo de calor conhecido e medir a diferença de temperatura entre as suas faces opostas. Já a capacidade térmica (C_T) está relacionada à quantidade de calor que um determinado corpo precisa receber para alterar a sua temperatura em 1°C e está diretamente relacionada com a massa deste corpo. Assim, tal proporcionalidade é definida pela grandeza calor específico (c), que pode ser entendida pela razão constante entre a C_T e a massa de um corpo.

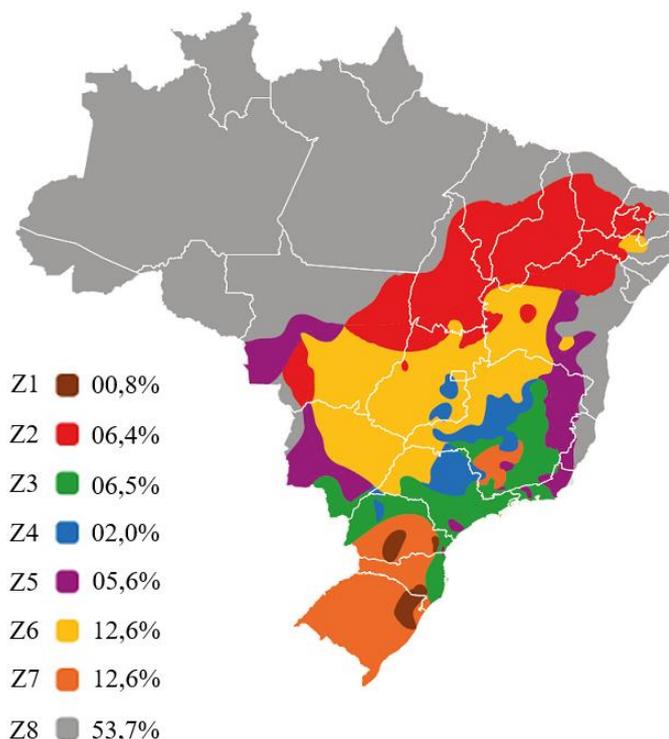


Figura 3.16: Zonas bioclimáticas brasileiras. Fonte: Adaptado de CONSTRUROHR (2020).

Uma vez variada à temperatura em um meio, o tempo necessário para que a variação térmica seja registrada na superfície oposta àquela cuja fonte de calor foi irradiada, é chamado de atraso térmico (φ), expresso em horas. O Fator solar (F_{so}) equivale ao quociente de radiação solar transmitida através de um corpo de prova opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a sua superfície externa. Por último, a condutividade térmica (k) quantifica a habilidade do material em conduzir energia térmica.

O “*Hot Box Test Method*” tem sido usado como um método confiável para medir propriedades térmicas de materiais de construção nos Estados Unidos por décadas. Com base neste método, o corpo de prova que se deseja analisar deve estar entre uma câmara quente e outra ambiental. A câmara quente é usada para simular o ambiente interno (lado quente), enquanto a câmara ambiental é usada para simular o ambiente externo (lado frio). A resistência térmica do corpo de prova pode então ser avaliada usando o fluxo de calor medido que atravessa o material analisado (LU e MEMARI, 2018).

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

A metodologia para a realização deste trabalho foi subdividida em caracterização das matérias-primas para a fabricação dos tijolos (rejeito de mineração de ouro, solo e misturas propostas), estudo de dosagem, e caracterização dos tijolos de solo-cimento produzidos.

A preocupação com a estreita faixa granulométrica do rejeito (passou por processos de fragmentação e classificação), bem como a estabilização de elementos químicos com potencial para contaminar o meio ambiente, levou a busca de um solo que pudesse ser misturado para a fabricação de tijolos tipo solo-cimento. Dessa forma, coletou-se solo próximo a atividade mineradora em um local que estava em fase inicial de construção de obra habitacional. Com o intuito de eliminar a fração orgânica do solo, esse foi retirado de uma profundidade de 50cm da superfície, armazenado em sacos de 50kg cada, fechado e transportado até os laboratórios de Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) onde foram realizados os testes de caracterização.

Quando realizados mais de uma vez para verificação da sua precisão, os resultados indicam o valor de desvio padrão ou estão apresentados de forma gráfica em barra de erro. A determinação deste parâmetro é possível graças a Equação 4.1:

(4.1)

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - MA)^2 / n}$$

Onde σ é o desvio padrão, x_i , o valor na posição i no conjunto de dados, MA , a média aritmética dos dados e n a quantidade de dados.

4.1. Amostragem do rejeito

O rejeito caracterizado foi coletado em pilha de rejeito de minério de ouro no município de Peixoto de Azevedo (onde também se extraiu o solo), pertencente a Zona Bioclimática Brasileira 8 como ilustra a Figura 4.1. A região foi escolhida pela elevada incidência de extração do metal. A planta de beneficiamento do empreendimento em questão opera de forma similar a vários outros do estado onde o ROM passa por circuito de fragmentação, classificação e concentração gravimétrica, onde o concentrado corresponde a produto comercial e o rejeito é direcionado para barragem. O material estocado na barragem é então lixiviado por cianetação. A fração não recuperada é direcionada para pátio de estocagem onde são formadas pilhas sem destinação industrial, formando passivos ambientais expostos a intempéries, sendo levados pela água em épocas de alto índice pluviométrico. Apenas este empreendimento possui vinte pilhas pós-lixiviação cada uma com média de mil toneladas. A Figura 4.2 ilustra uma sequência da disposição destes descartes onde observa-se a barragem de rejeitos após o beneficiamento, o carregamento

e o transporte desse material, as pilhas formadas para a lixiviação e o rejeito pós lixiviação. Apenas quatro das vinte pilhas existentes correspondem ao novo processo implantado. A média é de duas pilhas de rejeito cianetado por ano.



Figura 4.1: Local de coleta das matérias-primas para a fabricação de tijolos. Fonte: A Figura foi construída através de imagens do Google Earth e do Google (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brazil_Mato_Grosso_Cuiaba_location_map.svg>).

A metodologia adotada para a amostragem do rejeito, ainda que esteja em acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004), é mais detalhada do que a normatizada. Para a amostragem do material, uma dessas pilhas do processo novo foi dividida em duas pilhas longas com cerca de 2,5m de altura (com o auxílio de uma retroescavadeira) de onde foram retirados incrementos que formaram a amostra representativa que alimentou a caracterização. Uma pilha de rejeito proveniente do processo antigo também foi amostrada.



Figura 4.2: a) Barragem de rejeito b) Remoção dos rejeitos da barragem para alimentação da lixiviação c) Carregamento e transporte do rejeito d) Material para a lixiviação e) Material cianetado f) Material estudado - rejeito da cianetação.

Devido ao efeito pepita presente em minérios de ouro, os cálculos de amostra mínima representativa em função do teor e da distribuição granulométrica foram os sugeridos por Luz, França e Braga (2018) expostos nas Equações 4.2 e 4.3:

(4.2)

$$MS_t = \frac{IHL}{S_{FSE}^2}$$

(4.3)

$$MS_g = 18 \cdot f \cdot p \cdot \left(\frac{d_{95}^3}{S_{FSE}^2} \right)$$

Onde:

(4.4)

$$IHL = c \cdot f \cdot g \cdot l \cdot (d_{95}^3)$$

.

(4.5)

$$c = \frac{p_m}{al} \quad \text{para } al < 10\%$$

Onde MS_g é a massa mínima de amostra representativa em função do teor do mineral-minério, IHL a fórmula de Gy (cálculo de erros associados à amostragem), S_{FSE} é o máximo desvio padrão relativo do erro fundamental de amostragem, c é o fator de constituição mineralógica, $f = 0,2$ (fator de forma adotado para ouro), $g = 0,25$ (fator de granulometria adotado para materiais não calibrados), $l = 0,8$ (fator liberação adotado para materiais muito heterogêneos), $d_{95} = 1,2$ (diâmetro no qual 5% das partículas ficam retidas – obtido na análise granulométrica), $p_m = 16$ (densidade do ouro nativo), $al = 0,001$ (teor adotado do mineral de interesse); e MS_g é a massa mínima de amostra representativa em função da distribuição granulométrica.

Para submeter o material amostrado aos testes práticos, o mesmo foi transportado para o laboratório de Mecânica dos solos da UFMT e passou por preparação física de pesagem, secagem do material em estufa ($100 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24h), homogeneização com pás e quarteamento, primeiramente por pilha cônica e depois por divisores de Rifles (nº 90/12, nº 30/16 e nº 10/16 grelhas da marca Dialmatica). Alíquotas do último quarteamento alimentaram a caracterização.

Uma caracterização preliminar foi realizada por microscópio óptico de luz transmitida em faixas granulométricas no aparelho Olympus SZX12 com aumento de até 20 vezes a fim de nortear os ensaios subsequentes. O pH da amostra também foi conferido com pHmetro da marca Tecnopon previamente calibrado com soluções padrão.

4.2. Caracterização das matérias-primas

A caracterização das matérias-primas para a fabricação dos tijolos tipo solo-cimento foi subdividida em caracterização física, caracterização química, mineralógica e morfológica, caracterização ambiental e caracterização geotécnica.

4.2.1 Caracterização física

Sobre a caracterização física, a massa específica dos sólidos foi obtida por picnometria a gás Hélio (triplicata) em equipamento marca Quanta Chrome, modelo MVP-1, que trabalha com 120V na frequência de 50/60Hz, no laboratório de Análises Químicas da UFMG. Um porta amostra foi utilizado e o material foi cominuído em moinho de panela de laboratório da Inbrás para que todo ele fosse passante em malha de 58 μ m.

A análise granulométrica foi feita de duas maneiras distintas no laboratório de Mecânica dos Solos da UFMT: por peneiramento combinado - usual na caracterização de minérios -, e seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2017) - comum na caracterização de solos.

Em ambas as formas foram utilizadas peneiras da série Tyler (fabricante Bertel de 20cm de diâmetro montadas em agitador de peneiras suspenso de construção própria com motor Weg W22 e conjunto Steel 2100). Para estimar a quantidade de material peneirado nesta etapa, a massa de Gaudin foi calculada segundo a Equação 4.6:

(4.6)

$$M = \left(\frac{d_i + d_s}{2} \right) \cdot p \cdot A \cdot n$$

Onde M é a massa máxima retida em cada peneira (g); d_i a abertura da peneira em questão (cm); d_s a abertura da peneira imediatamente acima da escala (cm); p a densidade da amostra (g/cm³); A área da malha da peneira (314,16cm²); e n o número de camadas de partículas (3).

O peneiramento combinado, após o cálculo da massa de Gaudin, foi realizado em triplicata segundo a metodologia:

- O corte a úmido foi realizado em 38 μ m por 15 minutos com vazão de água de 1L/s;
- O *oversize* dessa etapa foi seco em estufa (100 \pm 5⁰C por 24h) e submetido a peneiramento a seco por 30 minutos. Foram utilizadas as peneiras de malha de 4475, 3350, 2360, 1700, 1180, 850, 600, 425, 300, 212, 150, 106, 75, 53, 45 e 38 μ m¹⁰.
- Já o *undersize* alimentou os testes no Cyclosizer Warman M4 (triplicata) cujas condições operacionais foram: temperatura (23^oC), vazão (200mm/s), peso específico (2,74g/cm³) e tempo de elutriação (20min).

Sobre a análise granulométrica conjunta segundo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2017), o peneiramento a seco foi realizado da mesma forma que o descrito anteriormente, entretanto o corte foi feito na malha de 75 μ m. O material passante foi submetido ao ensaio de sedimentação. Para tal, 70g foram dispostos em dois béqueres de vidro (500ml) e 125ml de hexametáfosfato de sódio (45,7g do sal para 1000g de água destilada) foram

¹⁰ Apesar da peneira de 45 μ m não compor a série de Tyler, ela foi adicionada tendo em vista a grande quantidade de finos e a massa de Gaudin calculada.

adicionados. Os béqueres foram agitados até que todo o material ficasse totalmente imerso e, após, mantidos em repouso por 24 horas.

Passado o repouso, as misturas foram submetidas, separadamente, à ação de um aparelho dispersor da marca Via Test (15min a 10000rpm). As misturas foram então dispostas em provetas (1000ml) onde foram realizadas agitações manuais, seguidas de medições conforme previsto na norma, com leituras aos tempos de sedimentação de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 min e 1, 2, 4, 8, e 24h, a contar do início da sedimentação.

Finalizada a etapa de sedimentação, calculou-se a média dos resultados aferidos em cada béquer. A fração fina resultante das soluções foi seca em estufa, e, posteriormente, classificado nas peneiras de 1180, 600, 425, 212, 150, e 75 μ m. Os resultados encontrados foram plotados em curva granulométrica.

Por último, a análise de área superficial específica (ASE) pelo método de Brunauer, Emmett e Teller (BET) e a distribuição de tamanho de poros pelo modelo de Barret, Joyner e Hallenda (BJH) foram realizadas em Quantachrome, modelo Nova 1000 com temperatura de degaseificação de 200°C utilizando como adsorvato o nitrogênio gasoso, no laboratório de Análises Químicas da UFMG.

4.2.2 Caracterização química, mineralógica e morfológica

A caracterização química foi realizada por fluorescência de raios-X (FRX), utilizado um espectrômetro da marca Shimadzu, modelo EDX-700HS no laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas da UFMT. Foram utilizados um feixe de 10mm de diâmetro e tensões no tubo de 15 e 50kV, respectivamente, para a detecção dos elementos do Na ao Sc e do Ti ao U. Todos os espectros foram adquiridos em vácuo, de maneira a melhorar a precisão das medidas para os elementos mais leves. As pastilhas foram preparadas pelo método de prensagem.

Já a mineralógica foi feita por difratometria de raios-X (DRX), em difratômetro Philips (Panalytical) para amostras em pó com sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW1830/40 e detector PW3020/000 executando varredura de 2θ de 20°-80°, no laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas da UFMT. Como preparo, as amostras foram cominuídas em moinho de panela da Inbrás. A partir do banco de dados Crystallography Open Database (COD), as fases minerais majoritárias foram identificadas através dos difratogramas obtidos.

A análise morfológica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento Phenom XL da ThermoFisher equipado com detector de energia dispersiva (EDS), visando a identificação dos elementos presentes e sua distribuição, no laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas da UFMT. Foram obtidas imagens em diferentes regiões das amostras em pó utilizando detector de elétrons retroespalhados (BSDFull). As alíquotas foram transferidas para os porta amostras de alumínio com fita condutora de carbono. Não foi necessário recobrimento metálico.

A técnica Fire assay foi realizada para análise de ouro através de fusão (com o PbO como reagente), copelação e digestão ácida (com HNO₃ e HCl) de 50g do material concentrado enviado para o laboratório particular SGS Geosol. O limite inferior de detecção do Au foi de 0,005ppm e o máximo de 100ppm.

Para tal, 20kg alimentaram o concentrador centrífugo Knelson (fabricante Mainland Machinery LTD) com relação $F_{\text{centrífuga}}/F_{\text{gravitacional}}$ igual a 80, taxa de alimentação de 1t/h, vazão de água de fluidização de $5\text{m}^3/\text{h}$ e pressão 20psi. A concentração centrífuga foi realizada no laboratório de Engenharia de Minas da UFMT e o concentrado obtido (cerca de 600g) foi encaminhado para análise de determinação de Au por Fire Assay, AAS, onde foi pulverizada e homogeneizada. A Figura 4.3 ilustra, da esquerda para a direita, o concentrador centrífugo, o Knelson em operação, e os anéis do equipamento finalizado o ensaio.



Figura 4.3: Concentrador centrífugo Knelson.

a) Técnicas auxiliares

Com o intuito de complementar as investigações química e mineralógica realizadas, técnicas auxiliares de caracterização térmica e de infravermelho também foram feitas no laboratório de Caracterização de Novos Materiais da UFMT.

O comportamento térmico dos materiais foi estudado por curvas termoanalíticas (resultantes das análises simultâneas termogravimétrica-TGA e térmica diferencial-DTA) obtidas com um analisador termogravimétrico da Shimadzu, modelo DTG-60H. Para tal, 10mg de cada amostra investigada foram colocados em cadinho cilíndrico de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (70 μL) e aquecidos da temperatura ambiente até 1000°C, atmosfera de ar seco com fluxo de 100mL/min com razão de aquecimento de 20°C/min. O software TA-60WS permitiu a interpretação dos dados obtidos.

Já as análises por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas num espectrofotômetro Shimadzu Irapaffinity-1 (modelo IRAffinity-1). Sobre o preparo da amostra, o espectro infravermelho foi obtido utilizando pastilha de brometo de potássio (KBr) preparada em laboratório. O brometo de potássio foi seco à 105°C em estufa por 24h antes das análises, e, depois, prensado na forma de pastilha em prensa hidráulica da Shimadzu Corporation (Modelo SSP-10A). Inicialmente realizou-se o procedimento de background utilizando a pastilha de massa 0,07g de KBr. Logo após a

aquisição do background, preparou-se uma pastilha com a relação de 0,07g de KBr para 0,0007g da amostra investigada. Para a aquisição qualitativa dos espectros de FTIR utilizou-se o software IRSolution com os seguintes parâmetros: modo medido (% transmitância), apodização (Happ_Genzel), número de varreduras (200), resolução (16), alcance (400 a 4000 cm^{-1}) e ganho (1).

4.2.3 Caracterização ambiental

A periculosidade do rejeito foi avaliada pela NBR 10004 (ABNT, 2004) que classifica os resíduos sólidos por meio de ensaios de lixiviação pela NBR 10005 (ABNT, 2004) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004). Os ensaios foram realizados no laboratório particular SGS Geosol.

Os testes de lixiviação foram orientados pela NBR 10005 (ABNT, 2004). Para tal, toda a amostra analisada deve ser passante em malha de 9,5mm. Alíquotas de $100 \pm 1\text{g}$ deverão alimentar o frasco de lixiviação (material inerte), e a solução de extração adicionada deverá ser equivalente a 20 vezes a massa da amostra utilizada. O frasco deverá ser fechado com uso de fita PTFE para evitar vazamento e mantido sob agitação durante 18 (± 2) h à temperatura máxima de 25°C com rotação de 30 (± 2) rpm no agitador rotatório. Após este período a amostra é filtrada (aparelho de filtração pressurizado ou a vácuo, com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6 - 0,8 μm). O pH do filtrado, denominado extrato lixiviado, é medido e os seus elementos químicos são analisados por Espectrometria de Absorção Atômica, AAS. O resultado obtido é comparado ao anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004).

Já os ensaios de solubilização seguiram as diretrizes da NBR 10006 (ABNT, 2004) que estabelece os requisitos necessários para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Para isso 250 g de amostra com tamanho inferior a 9,5mm é adicionada em frasco de 1,5L, e recebe a adição de 1L de água destilada, deionizada e isenta de orgânicos até que a polpa no frasco complete 1L. O frasco é então coberto com filme PVC e deixado em repouso por 7 dias (temperatura de até 25°C). Passado este tempo, a solução é filtrada com membrana de 45 μm . Mede-se o pH do filtrado (extrato solubilizado), e seus elementos químicos são analisados por Espectrometria de absorção atômica. O resultado obtido é comparado ao anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004). As análises dos extratos lixiviado e solubilizado foram realizadas utilizando como referências analíticas a *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW).

4.2.4 Caracterização geotécnica

Seguiu-se as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016) para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização geotécnica e limites de consistência, assim como para a determinação do teor de umidade higroscópica. Os ensaios foram realizados em triplicata no laboratório de Mecânica dos Solos na UFMT.

Para a verificação do teor de umidade higroscópica, três alíquotas com massa aproximada de 50g foram dispostas em cápsulas de alumínio para a determinação do parâmetro através da diferença de massa entre o rejeito úmido e seco (uso de balança com precisão de 0,01g e estufa elétrica $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24h) conforme a Equação 4.7, onde W é teor de

umidade (%); M_1 a massa do solo úmido mais a massa do recipiente (g); M_2 a massa do solo seco mais a massa do recipiente (g); e M_3 a massa do recipiente (g).

(4.7)

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

Para a determinação do Limite de Liquidez (LL), regido pela NBR 6459 (ABNT, 2016), 70g do material umedecido foram colocados no aparelho Casagrande. Nele, 10mm de espessura foram alcançados e também o surgimento de um sulco longitudinal de um cinzel padronizado para solos argilosos. A alavanca foi girada contra a base (2 rotações/s), caiu em queda livre e o número de golpes necessários para fechar o sulco aberto na amostra foram registrados. Para verificar a acurácia do ensaio, o mesmo foi realizado cinco vezes.

O Limite de Plasticidade (LP), norteado pela NBR 7180 (ABNT, 2016), foi determinado através de 10g do material que foram dispostos sobre uma placa de vidro fosca onde foram feitos cilindros de 3mm de diâmetro rolando o solo entre o vidro e a mão de 100mm de comprimento.

Ambas as amostras obtidas nos ensaios de LL e LP foram armazenadas em cápsula de alumínio, pesadas e secas em estufa por 24h (balança com precisão de 0,01g e estufa elétrica 100 ± 5 °C). O LL foi então calculado pela Equação 4.8.

(4.8)

$$LL = \frac{w}{1,419 - 0,3\log(n)}$$

Onde LL é o Limite de Liquidez (%); W é o teor de umidade (%) – Equação 4.7 - e n o número de golpes.

A Equação 4.9 traz o cálculo de LP .

(4.9)

$$LP = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

Onde LP é o Limite de Plasticidade (%); M_1 é a massa do solo úmido mais a massa do recipiente (g); M_2 a massa do solo seco mais a massa do recipiente (g); e M_3 a massa do recipiente (g).

Por fim, o IP (Índice de Plasticidade) é calculado pela Equação 4.10.

(4.10)

$$IP = LL - LP$$

Onde: IP é o Índice de Plasticidade, em %; LL o Limite de Liquidez, em %; e LP o Limite de Plasticidade, em %.

Como os ensaios geotécnicos aqui descritos para a determinação do teor de umidade higroscópica do material, de limites de consistência e de compactação não são comuns no dia-a-dia do Engenheiro de Minas, os mesmos estão ilustrados no Anexo II.

4.3. Estudo de dosagem

Os ensaios de compactação seguiram a metodologia descrita na NBR 12023 (ABNT, 2012) e foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da UFMT. Os ensaios foram realizados com a finalidade de se determinar a densidade aparente seca máxima (p_d) e o teor de umidade ótimo (w_{otm}) correspondentes à energia normal de compactação de misturas de solo-cimento (método A -100% < 4,75mm). Buscou-se os valores ótimos de umidade próximos aos sugeridos por Hallal, Sade e Najjar (2018), que fabricaram tijolos de solo-cimento com material argiloso, com este parâmetro compreendido entre 5-30%. Para os ensaios, 12 corpos de prova foram moldados (para cada traço) em cilindro pequeno (diâmetro = 10,0cm e altura = 17,8cm), compactados com soquete pequeno (2,48kg – altura de queda $305,0 \pm 2$ mm) em 3 camadas e 26 golpes por camada, segundo orientações da NBR 12024 (ABNT, 2012).

Produzidos os corpos de prova, amostras de aproximadamente 100g foram retiradas do centro dos cilindros, colocadas em cápsulas, pesadas e condicionadas em estufa para determinação de umidade no momento da compactação. Calculado o teor de umidade, a massa específica aparente da amostra compactada é dada pela Equação 4.11:

(4.11)

$$p = \frac{m_h}{V}$$

Onde p é a massa específica aparente da amostra compactada (kg/m^3), m_h é a massa da amostra compactada (kg) e V é o volume do molde (m^3).

Assim, a massa específica aparente seca da amostra compactada (p_s), em kg/m^3 , pode ser calculada pela Equação 4.12:

(4.12)

$$p_s = \frac{p}{w + 100} \times 100$$

Dessa forma, é possível traçar a curva de compactação marcando-se, nas abcissas, o teor de umidade (w), e nas ordenadas, a massa específica aparente seca (p_s). A Figura 4.4 ilustra os corpos de prova cilíndricos, CPs, formados. Os estudos de determinação de composição e dosagens também foram realizados em triplicata.



Figura 4.4: Extrator de corpo de prova à esquerda e corpo de prova desmoldado a direita.

Dentre as misturas propostas, fixou-se a quantidade de cimento tipo CII-Z-32 ao traço volumétrico de 1:10 (uma parte de cimento para 10 partes de rejeito e/ou solo) segundo as orientações do boletim técnico BT-111 publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP (2000).

Já as adições de solo variaram de 0 a 50%, baseadas nas sugestões encontradas em Roy, Adhikari e Gupta (2007) e Malatse e Ndlovu (2015). Em adição, buscou-se avaliar traços com a maior quantidade possível de rejeito visando os preceitos da economia circular defendidos por Zhang (2013) e Tayebi-Krorami *et al.* (2019). As proporções selecionadas estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Misturas ou traços volumétricos avaliados para a produção de tijolos tipo solo-cimento

Parâmetros	Razão Cimento:Rejeito:Solo			
% solo	0	10	30	50
Traço (volume)	1:10:0	1:9:1	1:7:3	1:5:5

Sobre a escolha do ligante, CADE (2019) reportou que os cimentos Portland compostos (CII) são os mais encontrados no mercado, correspondendo a aproximadamente 75% da fabricação industrial brasileira, utilizados na maioria das aplicações usuais em engenharia. Já sobre a localização das minas que fornecem esses insumos, Mato Grosso possui duas cimenteiras, ambas da Votorantim, em Nobres e em Cuiabá, sendo essa última, a mais próximas da cidade de Peixoto de Azevedo. A empresa produz, em MT, o CII-Z-32 e o CII-F-40, que correspondem, nessa ordem, a cerca de 60 e 40% da sua produção total. Em adição, o CII-Z-32 ($\%SO_3 \leq 4,5$, 94 -76% de clínquer +gesso, 6–14% de pozolana e 0-10% de material carbonático – Quadro 3.3) está listado como cimento satisfatório para a fabricação destes tijolos (ABCP, 2000).

Sete corpos de prova cilíndricos foram moldados com umidade ótima para cada traço e armazenados por sete dias em câmara úmida (temperatura de 23^oC e umidade relativa de 90%). Passados os sete dias, os CPs foram imersos em água por 4h, retirados, secos

(superficialmente com um pano), medidos e submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples previsto pela NBR 12025 (ABNT, 2012). Para tal, utilizou-se prensa SOLOTEST (capacidade de carga de 2000kgf) com carregamento uniaxial aplicado de forma constante com velocidade de 1mm/min; até o registro da carga de ruptura (dada pela deformação do anel). A Equação 4.13, permite o cálculo de resistência à compressão (f_t) para cada unidade dividindo-se a carga máxima observada durante o ensaio, pela área da força de trabalho.

(4.13)

$$f_t = F/S$$

Onde f_t é a resistência à compressão simples (MPa), F é a carga de ruptura do corpo de prova (N) e S é a área de aplicação de carga (mm^2). A média aritmética das 7 unidades, representa a f_t do lote. A Figura 4.5 ilustra os CPs sendo ensaiados neste teste.



Figura 4.5: Prensa para o teste de resistência à compressão uniaxial (esquerda) e corpo de prova cilíndrico sendo prensado (direita).

A fabricação dos tijolos tipo solo-cimento seguiu as orientações da NBR 10833 (ABNT, 2012). Dessa forma, rejeito, solo, cimento e água foram misturados em betoneira (Maqtron - 120L) até coloração uniforme e umidade ótima, segundo ensaio de compactação correspondente. A mistura foi então moldada em prensa manual MTS-010 da PERMAQ (pressão de prensagem máxima de 6 toneladas – tijolos com 10cm largura, 20cm comprimento, 5cm altura, e 5,1cm de diâmetro do furo). Os tijolos permaneceram em cura úmida por 7 dias e foram caracterizados após 28 dias, período requerido para cura do cimento.

4.4. Caracterização dos tijolos

Segundo a ABNT, para que um tijolo seja classificado como tipo solo-cimento, ele deve estar de acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012) que trata de análise dimensional, resistência à compressão e absorção de água; sendo essas as caracterizações principais.

Entretanto, o material investigado nunca foi caracterizado (rejeito de mineração de ouro), portanto, pouco se conhece sobre ele. Dessa forma, prosseguiu-se com investigações de durabilidade e periculosidade (caracterização ambiental). Os tijolos que apresentaram resultados mais satisfatórios também passaram por análises química, mineralógica e morfológica segundo as mesmas metodologias descritas para a caracterização das matérias-primas. Por fim, realizou-se a caracterização de desempenho térmico dos tijolos de traço mais promissor.

4.4.1 Caracterização segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012)

Dos 100 tijolos produzidos para cada mistura, após 28 dias, 10 foram retirados de forma aleatória (triplicata) para atender a NBR 8491 (ABNT, 2012) que estabelece diretrizes para análise dimensional (10 unidades), para ensaio de resistência à compressão simples (7 unidades) e absorção de água (3 unidades). Esta caracterização foi realizada no laboratório de Mecânica dos Solos da UFMT.

Para a análise dimensional, foi utilizado um paquímetro com resolução de 0,05mm para aferir as dimensões de 10 tijolos. A média obtida indica as dimensões do lote.

Para o ensaio de resistência à compressão (ft), foi utilizada uma máquina de compressão da EMIC (carregamento uniaxial aplicado de forma uniforme à razão de 50kgf/s) equipada com 2 pratos de aço para apoio (sendo um articulado), conforme estabelecido pela NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016). Sete tijolos foram cortados ao meio perpendicularmente à sua maior dimensão. As faces maiores foram superpostas e ligadas com camada fina de pasta de cimento Portland (o mesmo utilizado na fabricação dos tijolos- entre 2 e 3mm). As unidades ficaram aproximadamente 12h em repouso antes da retífica dos tijolos, para deixar suas faces planas e paralelas e garantir o perfeito contato entre as superfícies. Elas foram então imersas em água por 6h e retiradas logo antes da execução do ensaio. As cargas foram gradativamente elevadas até ocorrer à ruptura do tijolo. A NBR 8492 (ABNT, 2012), a partir da Equação 4.13, permite o cálculo de resistência à compressão (ft) para cada unidade dividindo-se a carga máxima observada durante o ensaio, pela área da força de trabalho. A média aritmética das 7 unidades representa a ft do lote.

Para o ensaio de absorção de água, os três tijolos restantes foram secos em estufa em temperatura entre 105 e 110°C por 24h, obtendo-se assim a massa seca (M_1). Em seguida o corpo foi imerso em água à temperatura ambiente por 24h. Após a imersão, os tijolos foram secos com um pano úmido e decorridos três minutos, sua massa úmida foi registrada (M_2). A NBR 8492 (ABNT, 2012) permite o cálculo da absorção de água (A) pela Equação 4.14 para cada unidade. A média aritmética das três unidades, representa a A do lote.

(4.14)

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

A Figura 4.6 ilustra, na sequência de a –f, a prensa manual utilizada, a mistura sendo colocada no molde, o tijolo tipo solo-cimento moldado, os tijolos numerados de 1-10 para atender a NBR 8491 (ABNT, 2012) para análise dimensional, tijolos imersos em água para o ensaio de absorção de água e um tijolo durante o teste de resistência à compressão.

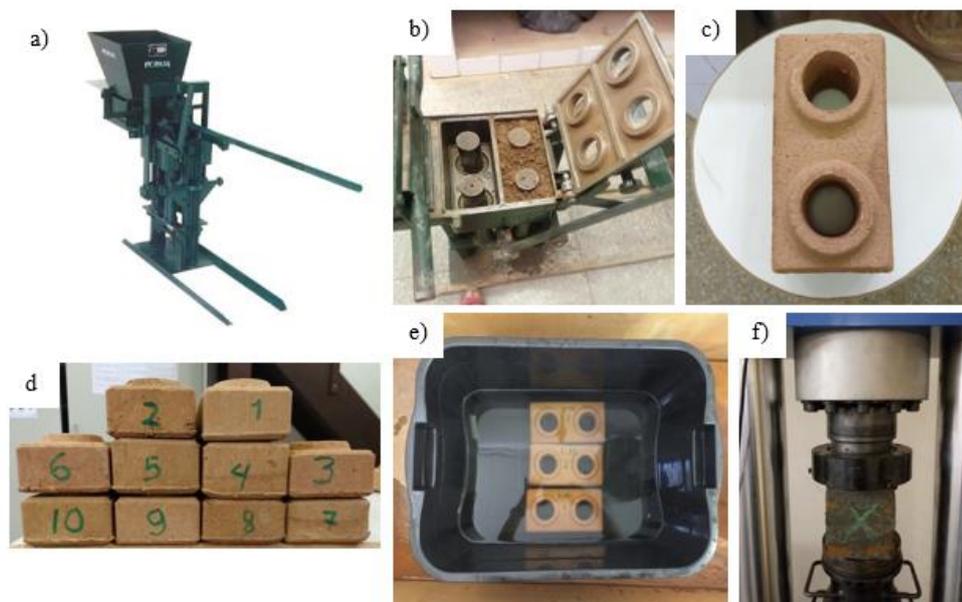


Figura 4.6: a) Prensa manual PERMAQ; b) moldagem do tijolo; c) tijolo moldado; d) tijolos para análise dimensional; e) ensaio de absorção de água; f) ensaio de resistência à compressão.

4.4.2 Caracterização de durabilidade

O ensaio de durabilidade realizado foi proposto por Grande (2003) e realizado no laboratório de Mecânica dos Solos da UFMT. Trata-se de uma adaptação da metodologia sugerida pela NBR 13554 (ABNT, 2012). Nele, o ensaio não é realizado em corpos cilíndricos, e sim em tijolos tipo solo-cimento com a exclusão da etapa de escovação. Segundo o autor, este ensaio de durabilidade modificado é mais adequado para tijolos pois as solicitações de abrasão superficial em paredes de alvenaria são menos severas que as previstas em outros usos de solo-cimento, tais como pavimentação, por exemplo. Para tal, três tijolos de cada traço foram ensaiados. O método prescreve 6 ciclos de molhagem e secagem de 48h, sendo 5h de imersão dos CPs em água e 42h em estufa ($71 \pm 2^{\circ}\text{C}$). Finalizados os ciclos, os CPs são colocados em estufa ($105 - 110^{\circ}\text{C}$) até atingir massa constante. Os dados coletados permitem calcular perda de massa através da Equação 4.15.

(4.15)

$$p_m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Onde p_m é a perda de massa dos corpos de prova (%); m_i é a massa seca inicial (g) dos CPs, e m_f é a massa final dos CPs (g).

4.4.3 Caracterização de desempenho térmico

Para a caracterização térmica dos tijolos de solo-cimento formados, construiu-se um corpo de prova de alvenaria (40,5cm altura x 40,5cm largura x 10,0cm espessura) com tijolos de traço 1:5:5 (cimento, solo e rejeito) úmido (umidade ótima obtida por ensaio de compactação Proctor normal). Os tijolos dessa composição foram escolhidos por terem apresentado resultados mais satisfatórios nas caracterizações antecedentes. A Figura 4.7 ilustra a confecção do corpo de prova que foi analisado termicamente.



Figura 4.7: Construção do corpo de prova – parede de tijolos tipo solo-cimento.

O objetivo da caracterização de desempenho térmico realizada foi comparar os valores encontrados de absorvância (α), transmitância térmica (U), atraso térmico (φ), capacidade térmica (C_T) e fator solar (F_{SO}) da parede de tijolo de solo-cimento com os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e NBR 15220-3 (ABNT, 2005) para a Zona Bioclimática (Z) 8, representada pela Figura 3.16, correspondente a zona da onde foram extraídos os materiais componentes do tijolo (rejeito de mineração e solo). Esta caracterização foi realizado no laboratório de Conforto Térmico da UFMT.

a) Ensaio de determinação da absorvância (α)

Devido a sua disponibilidade e precisão bastante satisfatória, demonstrados por Dornelles e Roriz (2006), utilizou-se o espectrômetro ALTA II para a determinação da absorvância do corpo de prova pesquisado. O equipamento fornece valores de tensão (mV) que são convertidos para valores de refletância (p). Dessa forma, a refletância medida pelo aparelho se refere ao quociente da taxa de radiação refletida pela parede pela taxa de radiação emitida nos espectros do aparelho.

Para que estes valores sejam transformados em refletância à radiação solar, adotou-se a metodologia do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E, 2015). O procedimento consiste em posicionar o ALTA II na superfície de uma folha de papel branca (de densidade 75g/m^2) que servirá como amostra de referência por apresentar valores de refletância ρ previamente conhecidos (valores comparados aos de Dornelles e Roriz, 2006).

A refletância (ρ) é então determinada por medições de onze diferentes comprimentos de onda (λ): sete na região visível (entre 470 e 700nm –Azul, Ciano, Verde, Amarelo, Laranja, Vermelho, Vermelho escuro) e quatro na região do infravermelho (entre 735 e 940nm – IR1, IR2, IR3, IR4).

O valor inicial da voltagem de fundo indicado no display é previamente aferido. Em seguida, o equipamento é posicionado na superfície do corpo de prova (no centro de um tijolo), protegido com um tecido preto (a fim de diminuir as interferências provocadas pela luz ambiente), e cinco leituras são realizadas para cada comprimento de onda (λ). A Figura 4.8 mostra o ALTA II aferindo a voltagem inicial de fundo.



Figura 4.8: Utilização do espectrômetro ALTA II para medição da refletância do corpo de prova.

As refletâncias foram medidas em porcentagem (%) e derivadas para cada comprimento de onda por meio da Equação 4.16, onde ρ_λ é a refletância do corpo de prova para um determinado comprimento de onda (%); V_λ é a voltagem da amostra medida no comprimento de onda (mV); V_f é a voltagem de fundo da amostra (mV); $V_{\lambda,ref}$ é a voltagem da amostra de referência medida no comprimento de onda (mV); $V_{f,ref}$ é a voltagem de fundo da amostra de referência (mV); e, ρ_{ref} é a refletância da amostra de referência (já conhecida), no comprimento (%).

(4.16)

$$\rho_\lambda = \left(\frac{V_\lambda - V_f}{V_{\lambda,ref} - V_{f,ref}} \right) \times \rho_{ref}$$

A *American Society for Testing and Materials*, ASTM (2012) descreve o procedimento G173 adotado para que os valores de refletância espectral da amostra, ρ_λ , sejam convertidos para as intensidades verificadas no espectro da radiação solar. Para tal, primeiramente transforma-se a refletância espectral, ρ_λ (%) em um valor adimensional, dividindo-a por 100. Em seguida, ρ_λ é multiplicada pela irradiação solar global espectral em cada comprimento de onda, obtendo-se, assim, a intensidade de irradiação do espectro solar padrão que seria refletida pela parede (se a fonte incidente fosse o sol). Isto é possível graças a Equação 4.17:

(4.17)

$$G_{(\lambda)} \text{ refletida} = \rho_{(\lambda)} \times G_{(\lambda)}$$

Onde $G_{(\lambda)} \text{ refletida}$ é a Irradiação solar global espectral refletida pela amostra ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$); $\rho_{(\lambda)}$ é a refletância espectral da amostra (adimensional) e $G_{(\lambda)}$ é a Irradiação solar global espectral ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$).

A intensidade de irradiação refletida pelo corpo de prova foi integrada em cada um dos intervalos de comprimento de onda do ALTA II (470nm a 940nm) por meio da Equação 4.18, em que $I_{(\lambda_x-y)\text{refletida}}$ é a intensidade de radiação solar global refletida pela amostra no intervalo (Wm^{-2}), $G_{(\lambda_x)\text{refletida}}$ é a irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda x ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$), $G_{(\lambda_y)}$ é a irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda y ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$), λ_x é o comprimento de onda x (nm) e λ_y é o comprimento de onda y, sendo $y > x$ (nm).

(4.18)

$$I_{(\lambda_x-y)\text{refletida}} = \frac{(G_{(\lambda_y)\text{refletida}} + G_{(\lambda_x)\text{refletida}})}{2} \times (\lambda_y - \lambda_x)$$

A irradiação solar global foi integrada em todos os intervalos de λ do equipamento por meio da Equação 4.19, em que $I_{(\lambda_x-y)}$ é a intensidade de irradiação solar global no intervalo (Wm^{-2}), $G_{(\lambda_x)}$ é a irradiação solar global no comprimento de onda x ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$), $G_{(\lambda_y)}$ é a irradiação solar global no comprimento de onda y ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$), λ_x é o comprimento de onda x (nm) e λ_y é o comprimento de onda y, sendo $y > x$ (nm).

(4.19)

$$I_{(\lambda_x-y)} = \frac{(G_{(\lambda_y)} + G_{(\lambda_x)})}{2} \times (\lambda_y - \lambda_x)$$

A refletância solar ajustada ao espectro solar padrão foi calculada por meio do quociente da soma das intensidades de irradiação refletida pela soma das intensidades de irradiação solar global (Equação 4.20), onde ρ_{solar} é a refletância solar ajustada (%), $I_{(\lambda_x-y)\text{refletida}}$ é a intensidade de radiação solar global refletida pela amostra no intervalo (Wm^{-2}) e $I_{(\lambda_x-y)}$ é a intensidade de irradiação solar global no intervalo (Wm^{-2}).

(4.20)

$$\rho_{solar} = \left(\frac{\sum_{\lambda=300}^{\lambda=2500} (\lambda_{x-y})_{refletida} I}{\sum_{\lambda=300}^{\lambda=2500} (\lambda_{x-y}) I} \right) \times 100$$

Por fim, sendo a soma das parcelas de radiação refletida e absorvida igual ao total da radiação incidente, a absorptância solar foi calculada por meio da Equação 4.21, em que α é a absorptância solar (adimensional) e ρ é a refletância solar (adimensional).

(4.21)

$$\alpha = 1 - \rho$$

b) Ensaio de determinação da transmitância térmica (U) e análises de erro

A ISO 9869 (ABNT, 2018) norteou o ensaio de transmitância térmica do corpo de prova que foi realizado simulando uma medição *in situ*, em caixa térmica composta por uma câmara quente e outra ambiental. A câmara quente (dimensões internas de 50,0cm altura x 50,0cm largura x 65,0cm espessura), foi confeccionada com placas de madeira MDF e placas de poliestireno, possui folhas de alumínio para revestimento do poliestireno, uma lâmpada de infravermelho (para produção de fonte de calor no interior da câmara - 250W), um dispositivo Dimmer (para ajustar a intensidade da luz de infravermelho), ventiladores e chicanas que fazem com que o ar circule internamente. Já a câmara ambiental (dimensões internas de 50,0cm altura x 50,0cm largura x 35,0cm espessura), foi construída com os mesmos materiais e objetiva isolar o lado de fora do corpo de prova da exposição direta às condições climáticas externas. A Figura 4.9 traz uma representação esquemática em corte transversal da câmara térmica, além de fotos das partes interna (vista frontal) e externa (vista lateral) da mesma.

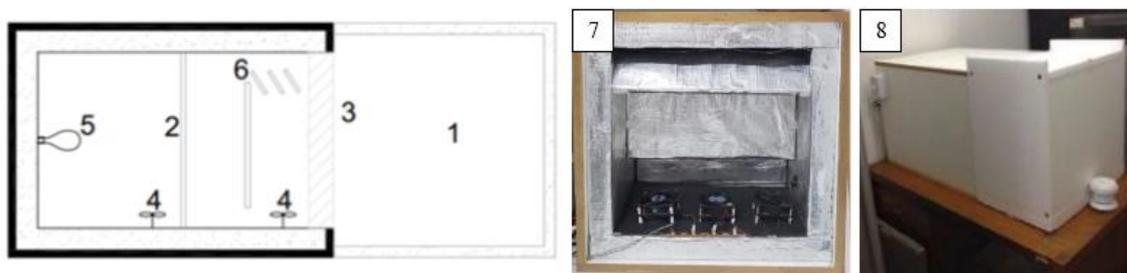


Figura 4.9: Representação esquemática da câmara térmica: 1- Câmara ambiente; 2- Câmara quente; 3- Corpo de prova; 4- Ventiladores; 5- Lâmpada de infravermelho; 6- Chicanas, 7-Fotografia interna, 8- Fotografia externa.. Fonte: Adaptado de Cordeiro *et al.* (2020).

Para avaliação *in situ* da transmitância térmica, colocou-se o corpo de prova numa da caixa quente protegida “*Hot Box Method*” entre a câmara quente e a ambiental. Seguiu-

se os procedimentos estabelecidos por Callejas, Durante e Oliveira (2017). Para tal, foram instalados no corpo de prova sensores de temperatura do tipo NTC 10k para a medição da temperatura superficial interna (T_{si}) e externa (T_{se}), em K, e dois sensores TMC20HD da marca OnsetComp em cada face da parede, voltados para o interior da câmara quente e exterior da climática. Os sensores foram instalados na posição central, em posição vertical, numa área representativa do corpo de prova. Os dois sensores externos de temperatura foram posicionados entre o sensor de fluxo de calor (fluxímetro), modelo HFPO1, fabricado por Hukseflux, instalado na posição vertical, visando medir o fluxo de calor que atravessa o corpo de prova. A ideia central do método é submeter uma diferença de temperatura (ΔT) entre as faces da parede, gerando um fluxo de calor (q), em Wm^{-2} , que será medido por técnica fluxométrica. Todos os sensores foram previamente calibrados segundo orientações do fabricante.

Para garantir a sua fixação, foi utilizada fita adesiva, que também evita o contato direto com o ar. Os sensores de temperatura foram então conectados ao registrador de dados automático U12-13 da marca Onsetcomp, e os fluxímetros, que avaliam o fluxo de calor que passa pelo corpo de prova, foram acoplados a um amplificador de tensão e a um registrador de dados automático U30 também da Onsetcomp. A câmara ambiental foi inserida após a instalação de todos os sensores. Foram configuradas leituras automáticas para 72 horas, com intervalo de amostragem de 5 minutos. A Figura 4.10 ilustra o corpo de prova de tijolos de solo-cimento posicionado em frente a câmara quente, a câmara ambiental fechada e fotos tiradas com câmera termográfica da marca FLIR, que realiza leitura instantânea de temperatura de superfícies. Os dados coletados foram planilhados e, por meio de cálculos descritos a seguir, permitiram a determinação dos parâmetros térmicos.

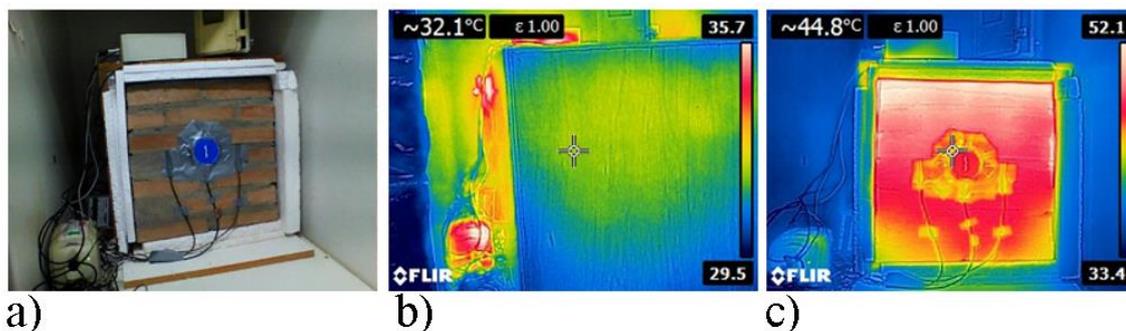


Figura 4.10: corpo de prova com fluxímetro e sensores de temperatura fixados, (b) câmara ambiental montada e (c) foto do corpo de prova obtida por meio de termo visor FLIR após término do ensaio.

A transmitância do corpo de prova foi calculada por meio da Equação 4.22, utilizando a média das temperaturas e das taxas de fluxo de calor através da espessura do corpo de prova em um período de 72 horas de medição após fluxo de calor estacionário ter sido alcançado.

(4.22)

$$U_n = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}$$

Assim, U_n é a transmitância térmica para cada intervalo de medição ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$); e j é o intervalo de tempo das medições durante o ensaio do corpo de prova (5min). Dessa forma, o cálculo de U_n para cada medição foi feito sucessivamente, com o valor calculado convergindo assintoticamente para o valor estimado.

Adotou-se a metodologia proposta por Baker (2011) para estimar as incertezas no valor da transmitância térmica a partir das incertezas das medições individuais dos sensores e o desvio padrão (σ) observado no ensaio. Para a incerteza da medição, os erros de calibração dos instrumentos declarado pelos fabricantes foram assumidos. A Equação 4.23 permite o cálculo da incerteza geral sobre a estimativa da transmitância (δU_n), onde U_{err_Tsi} , U_{err_Tse} e U_{err_Q} são os valores de U calculados pela aplicação dos erros durante a medição das variáveis de temperatura interna, temperatura externa e fluxo de calor, em $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

(4.23)

$$\delta U_n = \sqrt{[(U_n - U_{err_Tsi})^2 + (U_n - U_{err_Tse})^2 + (U_n - U_{err_Q})^2 + \sigma^2]}$$

Para que o valor obtido de U tenha um valor de confiança próximo a 95%, adotou-se o fator de abrangência (k) igual a 2 (BAKER, 2011).

Dessa forma, a Equação 4.24 permite o cálculo final de transmitância térmica.

(4.24)

$$U = U_n \pm k \cdot \delta U_n$$

c) Cálculo de resistência térmica (R_T), capacidade térmica total (C_T), condutividade térmica (k), atraso térmico (ϕ) e fator solar (FS_o)

A partir do cálculo da transmitância térmica (U), torna-se possível a determinação da resistência térmica (R_T em m^2KW^{-1}) através da Equação 4.25:

(4.25)

$$R_T = 1/U_T$$

Já o calor específico (c em $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) foi estimado pela Equação 4.26 onde ρ é a massa específica do material (kgm^{-3}); e a espessura do corpo de prova (m); A a área do corpo de prova (m^2); q_1 e q_2 os fluxos de calor médio interno e externo, nesta ordem (W); i a

representação de cada medição; Δt a variação do tempo entre cada medição (s), T_1 e T_2 as médias das temperaturas interna (T_{si}) e externa (T_{se}), respectivamente ($^{\circ}\text{C}$); e, T_i a temperatura inicial, associada a temperatura do ambiente no início das medições ($^{\circ}\text{C}$).

(4.26)

$$c = \frac{1}{\rho \cdot e \cdot A} \left(\sum_{i=1}^n q_1 - \sum_{i=1}^n (q_2 \cdot \Delta t) / \frac{(T_1 + T_2)}{2} - T_i \right)$$

A condutividade térmica (k) em $\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ foi estimada conforme proposto por Nicolau, Guths e Silva (2002) por meio da Equação 4.27.

(4.27)

$$k = \frac{1}{2} (q_1 + q_2) \frac{e}{A \cdot (T_1 - T_2)}$$

Já a capacidade térmica total (C_T), foi calculada por meio da contribuição de cada elemento presente na estrutura do corpo de prova por meio da Equação 4.28.

(4.28)

$$C_T = \sum_{n=1}^n k \cdot R \cdot c \cdot \rho = \sum_{n=1}^n e \cdot c \cdot \rho$$

O atraso térmico (φ), em horas, foi determinado seguindo a recomendação da NBR 15220 (ABNT, 2005) por meio da Equação 4.29.

(4.29)

$$\varphi = 0,7284 \sqrt{R_t \cdot C_t}$$

Por fim, para o cálculo do fator solar (F_{SO}) utilizou-se a Equação 4.30 onde U é a transmitância térmica total do corpo de prova e α é a absorptância do mesmo.

(4.30)

$$F_{SO} = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

4.5 Análise de custos

Uma breve análise financeira foi realizada com o intuito de discutir a viabilidade econômica da produção dos tijolos tipo solo-cimento de traço 1:5:5. Ainda que o foco principal do presente trabalho seja o viés ambiental associado ao aproveitamento de rejeito de mineração, é comum que propostas em engenharia contenham análises

financeiras. Dessa forma, foi levantado um orçamento contendo a estrutura, os equipamentos e o pessoal necessários para que o empreendimento em questão implante uma unidade de fabricação de tijolos dentro da sua própria área. Para o levantamento de insumos e equipamentos, realizou-se a média aritmética de três orçamentos (fornecedores locais ou o mais próximo quanto possível); já para o de mão de obra foi adotada a metodologia proposta pela Fundação Getúlio Vargas, FGV (2012).

O retorno financeiro deste empreendimento foi avaliado segundo a metodologia clássica de análise de investimentos em ativos reais, que se baseia na definição de uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e nos indicadores Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback*, conforme sugerido por Souza e Clemente (2012).

A Equação 4.31 traz o Valor Presente Líquido (VPL), que pode ser entendido como fórmula econômico-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo de investimento inicial (SOUZA e CLEMENTE, 2012).

(4.31)

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Onde I é o investimento do projeto, FC_t é o fluxo de caixa no período t , t é o n ésimo período no tempo em que o dinheiro será investido no projeto, n é o número de períodos t e i é o custo do capital.

Já a Equação 4.32 traz a Taxa de Retorno (TIR), que diz respeito a taxa de juros para a qual o valor presente das receitas torna-se igual aos desembolsos; em outras palavras, a TIR é a taxa que torna nulo o VPL do projeto.

(4.32)

$$VPL = 0 = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t}$$

Foi considerada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10,0% ao ano, equivalente à taxa do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) indicado pelo Banco Central do Brasil (2021).

Assim, considerados o montante inicial, os gastos fixos, a produção e a venda dos tijolos, o *payback* é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento.

Por fim, a Tabela 4.2 sumariza a metodologia adotada, onde “x” indica a execução do ensaio para um determinado material.

Tabela 4.2: Metodologia adotada

Caracterização dos materiais/ método		Rejeito	Solo	CPII-Z-32	Misturas	Tijolos
Física	Massa específica: Picnometria a gás (Hélio)	x	x			
	Distribuição granulométrica (NBR 7181)	x	x		x	
	Área superficial específica (BET) e porosimetria (BJH)	x	x			
Geotécnica	Teor de umidade (NBR 6457)				x	
	Limite de Liquidez (NBR 6459)				x	
	Limite de Plasticidade (NBR 7180)				x	
Mineralógica	Difração de raios - X (DRX)	x	x			x
Química	Fluorescência de raios - X (FRX)	x	x	x	x	
	Fire Assay	x				
Morfológica	Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)	x	x			x
Ambiental	Classificação de resíduos sólidos (NBR 10004)	x				x
	Lixiviação (NBR 10005)	x				x
	Solubilização (NBR 10006)	x				x
Tijolo tipo Solo-cimento	Análise dimensional (NBR 8491)					x
	Absorção de água (NBR 8491)					x
	Resistência à compressão (NBR 8491)					x
	Durabilidade modificado					x
	Análise de conforto térmico					x

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos das caracterizações realizadas nas matérias-primas, nos tijolos fabricados, e os estudos de dosagens, bem como, as discussões pertinentes, são apresentadas nesse capítulo.

5.1. Amostragem do rejeito

Duas pilhas de rejeito de ouro já cianetado foram amostradas, uma resultante do novo processo de concentração R_{novo} , e outra resultante do antigo processo R_{antigo} . Para cada uma delas, duas pilhas longas foram formadas para a obtenção dos incrementos que foram armazenados em sacos plásticos e transportados para a UFMT. Cada incremento constituía uma massa mínima representativa de amostragem, segundo a metodologia proposta por Luz, França e Braga (2018).

As fórmulas e parâmetros sugeridos pelos autores estão no Quadro 5.1, onde observa-se que a massa mínima representativa pode estar expressa em função da distribuição granulométrica MS_g ou em função do teor do mineral-minério MS_t . O valor encontrado de MS_t (aproximados 50kg) foi 10 vezes maior que o estimado para MS_g (cerca de 5,0kg). No presente trabalho o MS_t foi adotado, uma vez que o efeito pepita é relevante na amostragem de ouro. Dessa forma, 10 incrementos de 50kg cada foram retirados de ambas as pilhas R_{novo} e R_{antigo} . O material foi transportado para a UFMT onde ele foi novamente homogeneizado, e dividido (pilha cônica e divisor de Rifles) para alimentar as etapas subsequentes.

A análise preliminar apontou pH da amostra de rejeito de 8,5 ($\sigma = 0,3$). Nesta faixa de pH (próximo a 9,0), pode ter havido volatilização de parte do cianeto contido no rejeito devido a formação de gás cianídrico em ambiente não isolado, como discutido previamente na revisão bibliográfica (CIMINELLI e GOMES, 2002; NEVES *et al.*, 2014).

A Figura 5.1 apresenta imagem das partículas minerais de diferentes formatos, sendo o arredondado, o mais frequente. Observa-se distintas colorações que indicam a variedade de minerais presentes na amostra, destacando-se a cor dourada, característica de sulfetos, e partículas com o hábito micáceo.

Uma vez tomadas as alíquotas representativas, 50kg provenientes de ambas as pilhas (R_{novo} e R_{antigo}) alimentaram o concentrador centrífugo Knelson (teste realizado em triplicata). Os concentrados passaram por análise de determinação de Au por Fire Assay, AAS. O empreendimento em questão considera o teor do corte (teor acima do qual torna-se viável lavar e processar o minério) como 0,1g/t. Como resultado, o concentrado decorrente da alimentação R_{novo} apresentou quantidade de Au abaixo do teor de corte. Em contrapartida, o concentrado da alimentação R_{antigo} apresentou, na análise AAS, teor de 5,2g/t ($\sigma = 0,9$). Dessa forma, visto o alto valor associado do Au, e possíveis maneiras de se recuperá-lo futuramente, descartou-se o material proveniente da pilha R_{antigo} para a fabricação dos tijolos tipo solo-cimento. Todos os testes subsequentes dizem respeito ao material R_{novo} .

Quadro 5.1: Parâmetros utilizados para a amostragem do rejeito

Determinação da massa mínima representativa de amostragem		
Parâmetros para a determinação de MS_t e MS_g Fonte: Luz, França e Braga (2018)	Valor adotado	Fonte: pág:
c (Fator de constituição mineralógica) = pm/al pm (Densidade do constituinte de interesse) al (Teor adotado do mineral de interesse) c	16 0,001	60 autora
IHL (Fórmula de Gy) = $c.f.g.l.d^3$ f (Fator de forma) g (Fator de granulometria) l (Fator de liberação) d(d_{95}) IHL (kg)	0,2 0,25 0,8 1,2	60 60 40 autora
MS_t (Massa mínima em função do teor) = IHL/S^2_{FSE} S_{FSE} (máximo desvio padrão do erro fundamental de amostragem) MS_t (kg)	0,15	60
MS_g (Massa mínima em função do tamanho) = $18.f. pm.(d^3/S^2_{FSE})$ MS_g (kg)		
		4,42

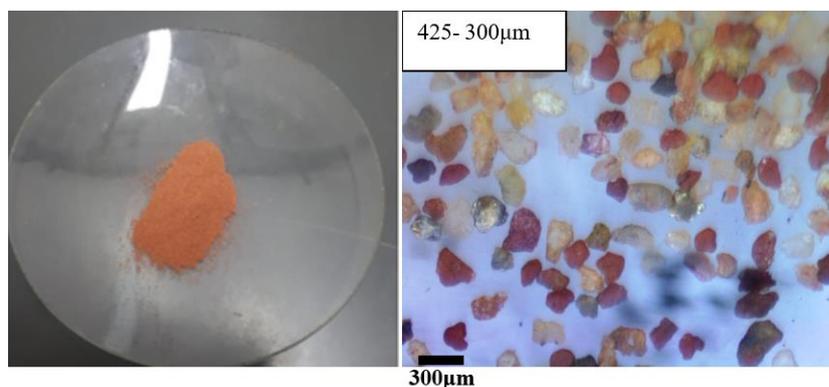


Figura 5.1: Imagens do rejeito por registro fotográfico e microscopia ótica

5.2. Caracterização das matérias-primas

Obteve-se uma massa específica do rejeito apontou um valor de $2,74\text{g/cm}^3$ ($\sigma = 0,1$), bem próxima a do solo, de $2,80\text{g/cm}^3$ ($\sigma = 0,1$). Os valores encontrados estão dentro do esperado, visto que os principais minerais esperados para ambos os materiais são quartzo ($2,65\text{g/cm}^3$), micas ($\cong 2,75\text{g/cm}^3$) e feldspatos (entre $2,5$ e $2,8\text{g/cm}^3$). Como os valores

de ambos materiais são similares, admite-se que os valores das misturas serão desta ordem (KLEIN e DUTROW, 2012).

Devido à grande quantidade de finos na amostra, o peneiramento combinado (peneiramento + Cyclosizer) foi feito em triplicata (em nenhuma faixa granulométrica $\sigma > 0,7$). A distribuição granulométrica do peneiramento médio está representada na Tabela 5.1 e na Figura 5.2 onde os valores aproximados de $d_{95} = 1,2\text{mm}$ (utilizado no Quadro 5.1 para o cálculo de IHL), e da abertura de $0,075\text{mm}$ foram destacados. As massas retidas nas peneiras não ultrapassaram o valor máximo estimado por Gaudin.

Tabela 5.1: Distribuição granulométrica do rejeito

Análise de distribuição granulométrica			
Série Tyler		Peneiramento médio	
Abertura (mm)	Massa de Gaudin (g)	% Retida acumulada	% Passante acumulada
3,350	1.045,87	0,00	100,00
2,360	737,28	1,34	98,66
1,680	521,65	3,16	96,84
1,200	371,87	5,34	94,66
0,850	264,70	8,02	91,98
0,600	187,22	10,93	89,07
0,425	132,35	15,90	84,10
0,300	93,61	21,49	78,51
0,212	66,11	27,03	72,97
0,150	46,74	32,40	67,60
0,106	33,05	38,04	61,96
0,075	23,37	42,01	57,99
0,053	16,53	46,04	53,96
0,045	12,65	49,56	50,44
0,038	10,72	52,35	47,65
0,036	-	54,50	45,50
0,026	-	56,28	43,72
0,019	-	61,24	38,76
0,013	-	67,19	32,81
0,010	-	73,54	26,46
< 10 μm	-	100,00	0,00

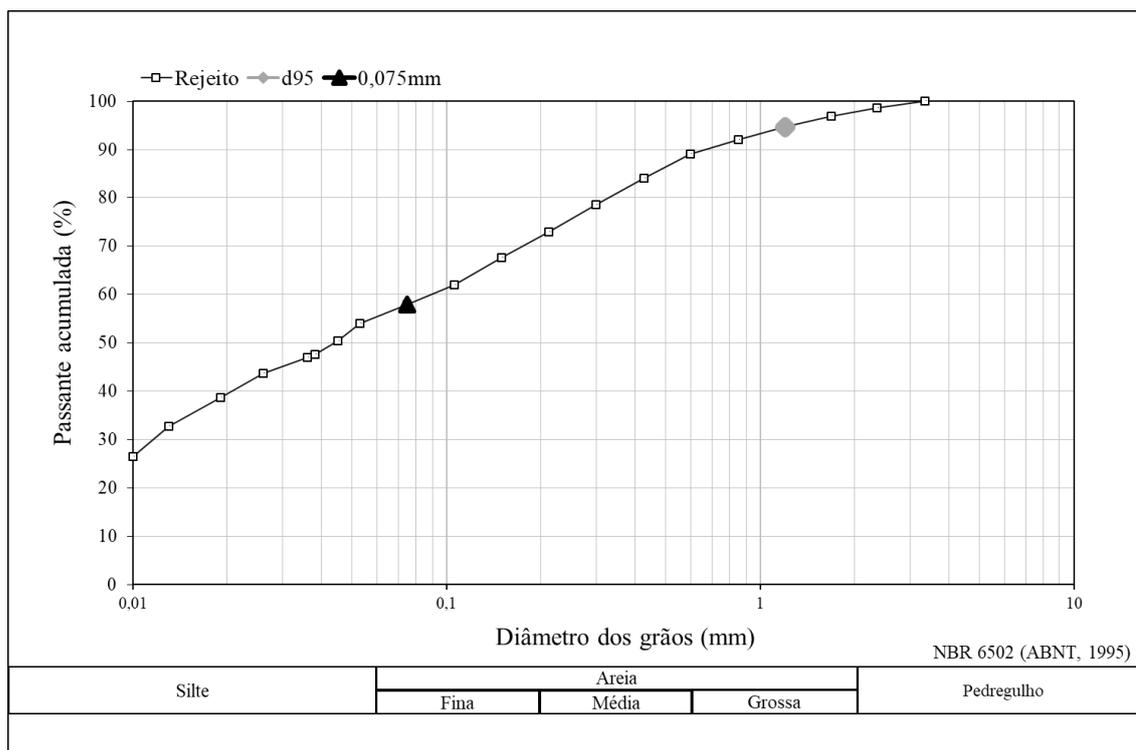


Figura 5.2: Análise granulométrica do rejeito.

Através da Figura 5.2 é possível observar que o peneiramento combinado realizado não abrange a faixa argila definida pela NBR 6502 (ABNT, 1995). Isso se deve ao fato do último ciclone classificar as partículas em torno de 0,01mm, enquanto os grãos de argila são menores que 0,002mm. A metodologia utilizada é comumente empregada na análise granulométrica de minérios porque dificilmente partículas menores que 0,01mm são aproveitadas na concentração mineral. Entretanto, conhecer as frações definidas pela normativa faz-se interessante para a caracterização geotécnica. Dessa forma, o rejeito, o solo e as misturas propostas passaram por análise de distribuição de tamanhos segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018) e os resultados estão representados na Tabela 5.2.

Assim, a Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos na análise de distribuição de tamanhos e os compara com a classificação granulométrica segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995) para o rejeito e o solo utilizados, bem como para as misturas propostas. Os resultados mostram que menos que 5% do rejeito é considerado pedregulho, 46% é areia, 27% silte e que 21% da amostra corresponde à fração argila. A NBR 10833 (ABNT, 2012) considera recomendável para a produção de solo-cimento solos com 100% dos grãos passantes na peneira de 4,75mm e de 10% a 50% passantes na malha de 0,075mm. Dessa forma, o rejeito estudado, embora apresente partículas 100% passantes em 4,75mm, possui cerca de 58% do material passante em 0,075mm, o que indica a necessidade de combinação com outro material de fração mais grossa. Assim, o solo coletado foi escolhido pela sua característica arenosa. Para que este solo pudesse ser utilizado na produção de tijolo tipo solo-cimento, o mesmo foi peneirado em 4,75mm. Sobre as misturas avaliadas, com adição de 0 - 50% de solo (ou traços volumétricos de 1:10:0, 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5), nota-se que quanto maior a adição, menor o carácter argiloso

das mesmas. Todas elas estão de acordo com as especificações da NBR 10833 (ABNT, 2012).

Tabela 5.2: Resultados da análise de distribuição granulométrica segundo a NBR 7180 (ABNT, 2018)

Distribuição granulométrica							
NBR 6502 (ABNT, 1995)		Rejeito	Solo	Misturas (%)			
Grupo	Diâmetro dos grãos (mm)	(%)	(%)	1:10:0	1:9:1	1:7:3	1:5:5
Pedregulho	$2 \leq d \leq 20$	5	48	5	8	11	13
grossa	$0,6 \leq d \leq 2$						
Areia média	$0,2 \leq d \leq 0,6$	46	42	46	46	45	44
fina	$0,06 \leq d \leq 0,2$						
Silte	$0,002 \leq d < 0,06$	27	1	27	26	23	22
Argila	$d < 0,002$	21	8	21	21	20	21
Distribuição granulométrica							
NBR 10833 (ABNT, 2012)		Rejeito	Solo	Misturas (%)			
		(%)	(%)	1:10:0	1:9:1	1:7:3	1:5:5
% Passante em 4,75 mm = 100%		100	50	100	100	100	100
% Passante em 0,075 mm = entre 10 e 50%		58	10	58	48	43	35

Em consonância com a distribuição de tamanhos, a área superficial específica, ASE, mostrou que o rejeito, por ser mais fino, de caráter mais argiloso que o solo, possui área superficial específica três vezes maior que este (ASE rejeito = 13,847 m²/g; ASE solo = 4,512 m²/g), e o dobro do volume de poros (volume de poros rejeito = 0,023 cm³/g; volume de poros solo = 0,010 cm³/g). De maneira análoga, quanto maior a adição de solo, menor o caráter argiloso da mistura, e menor a sua ASE.

O valor de ASE encontrado para o rejeito foi superior ao reportado por Ladeira Ciminelli e Nepomuceno (2002), que indicou valor de ASE 5,2m²/g para rejeito aurífero no estado de Minas Gerais; entretanto as distintas formações geológicas e processos de fragmentação aos quais os minérios foram submetidos devem ser considerados. Já Mkaouar *et al.* (2019) encontraram para este parâmetro resultados entre 22 e 64m²/g para solos argilosos coletados para a fabricação de tijolos tipo solo-cimento na Tunísia; quanto maior o caráter argiloso do material, maior será a sua área superficial específica.

A Tabela 5.3 apresenta os minerais majoritários presentes nas matérias-primas, determinados por DRX, onde “x” indica que um determinado mineral foi encontrado para aquele material. O Anexo III contém os difratogramas obtidos. Observa-se que em ambos foram encontrados quartzo, hematita, caulinita e muscovita, minerais comuns em solos brasileiros (TSUTIYA, 1999; FERREIRA, 2001; NEVES *et al.*, 2014).

Tabela 5.3: Fases minerais majoritárias encontradas nas matérias-primas por DRX

Mineral	Fórmula química	Rejeito	Solo
Quartzo	SiO ₂	x	x
Hematita	Fe ₂ O ₃	x	x
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	x	x
Muscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀) (F,OH) ₂	x	x
Feldspato	(K, Na, Ca) (Si, Al) ₄ O ₈	x	
Clorita	((Mg,Al,Fe) ₁₂ (Si,Al) ₈ O ₂₀)	x	
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	x	
Calcopirita	CuFeS ₂	x	
Pirita	FeS ₂	x	
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	x	
Goethita	FeO (OH)		x
Gibbsita	Al(OH) ₃	x	x

Em concomitância com as fases minerais identificadas, Oliveira (2017) descreveu a formação rochosa granítica que dá origem ao rejeito estudado e os minerais quartzo, mica, feldspato, pirita e calcopirita foram observados. O autor também aponta a existência de magnetita, entretanto o rejeito apresentou o óxido de ferro oxidado, hematita.

Já a Tabela 5.4 traz a composição química para o rejeito, o solo, as misturas avaliadas e o cimento CII-Z-32 utilizado. Observa-se que os elementos majoritários são Si, Al e Fe para o rejeito e para o solo, seguidos pelos de Mg, K, Ti, S e Mn. Os elementos Cu, Zr, V, Sr e Rb foram encontrados no rejeito, em pequenas proporções, mas não foram identificados no solo. Em conformidade com os resultados encontrados, Ferreira (2001) relata a predominância de solos com baixos teores de P, K, Ca, Mn, e matéria orgânica na região de Alta Floresta, que abrange o município de Peixoto de Azevedo.

Para o CII-Z-32 foram encontrados %SO₃ < 4,5 e altos teores de CaO, SiO₂ e Al₂O₃, como recomendado pela NBR 16697 (2018) – Quadro 3.3.

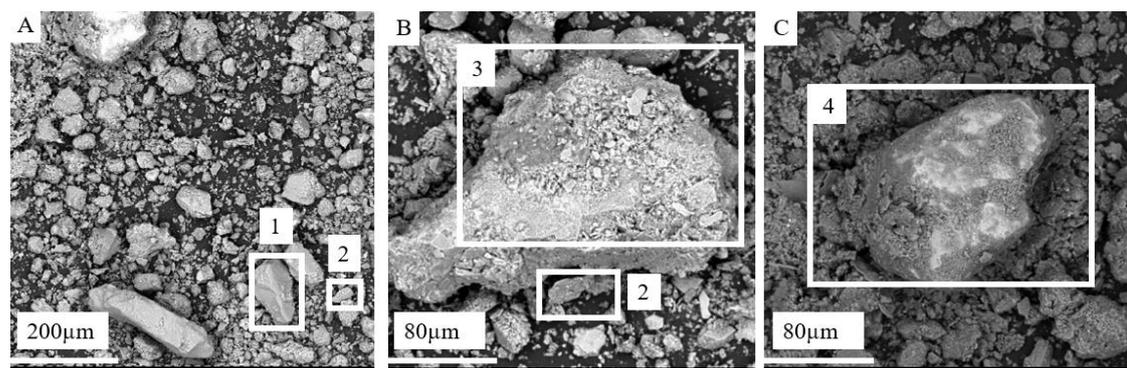
Como os principais elementos identificados são comuns para o rejeito e para o solo, as misturas também apresentam composição química similar, com aumento do teor de CaO devido a adição de cimento. A caracterização química está coerente com a mineralógica obtida.

Tabela 5.4: Caracterização química por FRX

%Óxidos	Fluorescência de Raios - X						
	Das matérias - primas			Das misturas/ traços (volumétricos)			
	Rejeito	Solo	CPII-Z-32	1:10:0	1:9:1	1:7:3	1:5:5
SiO ₂	45,63	52,05	22,58	45,63	45,63	45,80	46,54
Al ₂ O ₃	29,54	27,03	6,47	28,54	29,49	23,80	25,56
Fe ₂ O ₃	10,59	15,57	3,16	10,59	10,59	14,37	13,34
CaO	6,59	0,01	58,67	9,00	9,10	8,14	8,75
MgO	3,09	1,45	2,94	3,09	3,02	3,47	2,24
K ₂ O	2,06	2,64	1,06	2,06	2,06	2,14	1,77
TiO ₂	1,36	1,02	0,25	1,36	0,90	1,13	0,88
SO ₃	0,82	0,10	4,38	0,82	0,56	0,97	0,75
MnO	0,11	0,07	0,20	0,11	0,07	0,33	0,06
CuO	0,06	-	-	0,06	0,06	0,11	0,03
ZrO ₂	0,06	-	-	0,06	0,06	0,06	0,03
V ₂ O ₅	0,05	-	-	0,05	0,05	0,06	-
SrO	0,03	-	-	0,03	0,03	0,05	-
Rb ₂ O	0,01	-	-	-	-	-	-

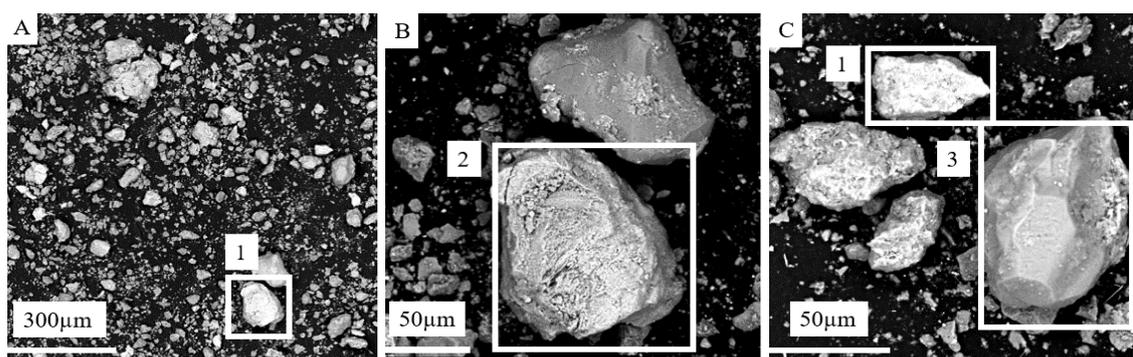
A Figura 5.3 apresenta imagens do rejeito, em algumas áreas (A, B e C) e subáreas (1, 2, 3 e 4) obtidas por MEV associado ao EDS. Nas áreas foram encontrados os elementos O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, K e S, também observados na análise química. O elemento carbono deve-se ao preparo da amostra. A subárea 1 é composta por uma partícula anédrica, angulosa, com fraturas conchoidais, características típicas do mineral quartzo, de dimensões da ordem de 100µm. As demarcadas pelo número 2 (tamanhos inferiores a 80µm), apresentam partículas com formato lamelar que podem estar associados ao grupo das micas. Já a subárea 3 mostra um aglomerado com dimensões superiores a 200µm composto de pequenos grãos subédricos e outros com superfícies de fratura relativamente planas. Por fim, a subárea 4 (tamanhos próximos a 200µm) apresenta uma textura terrosa, que pode ter relação com os argilominerais, como a caulinita, por exemplo (KLEIN; DUTROW, 2012).

De modo análogo, a Figura 5.4 evidencia as regiões (A, B e C) e sub-regiões (1, 2, 3, 4) analisadas para o solo. Nas regiões foram encontrados os elementos O, Si, Al, Fe, Mg, K e Ti, também observados na análise química. A tonalidade mais clara da sub-região 1 (dimensões próximas a 100µm) bem como seu aspecto mais maciço pode indicar a presença de minerais de ferro, taikis como hematita e goethita. A subárea 2 (tamanhos inferiores a 45µm) apresenta poros, tonalidade mediana, e textura mirmequítica encontrada com frequência em cristais de feldspato. Como já discutido, a demarcação 3 apresenta angulosidade e fraturas conchoidais típicas do quartzo. As morfologias discutidas, tanto para o rejeito quanto para o solo, indicam a presença de minerais já identificados previamente (KLEIN; DUTROW, 2012).



Região	Elemento químico/ concentração atômica								
	O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	K	S	C
A	66,37	16,94	8,51	3,12	1,42	2,02	0,84	0,78	-
B	59,60	15,36	10,95	4,17	-	3,43	-	0,37	6,11
C	58,62	11,99	8,56	5,73	-	8,08	6,00	0,35	0,67

Figura 5.3: Análise MEV/EDS do rejeito.



Região	Elemento químico/ concentração atômica							
	O	Si	Al	Fe	Mg	K	Ti	C
A	61,08	13,05	11,82	4,00	0,31	1,02	5,22	3,50
B	68,97	15,74	9,86	4,32	-	1,11	-	-
C	44,96	11,24	10,86	22,44	-	1,19	4,04	4,27

Figura 5.4: Análise MEV/EDS do solo.

Os limites de consistência de todas as misturas estudadas estão apresentados na Figura 5.5. Observa-se decréscimo dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) na medida que se aumenta a fração de solo nas misturas, enquanto o índice de plasticidade (IP) praticamente não se altera. A redução da fração de rejeito, e conseqüente diminuição da fração fina das misturas, contribui para a redução dos seus limites de consistência. Ainda que o traço volumétrico 1:10:0 (sem adição de solo) apresente valor de LL bem próximo ao máximo permitido, todas as misturas apresentam valores de limites de liquidez e de índice de plasticidade menores do que os limites máximos ($LL_{\text{máx}} = 45\%$, $IP_{\text{máx}} = 18\%$)

recomendados pela NBR 10833 (ABNT, 2012); todas as misturas propostas estão, portanto, em acordo com a normativa.

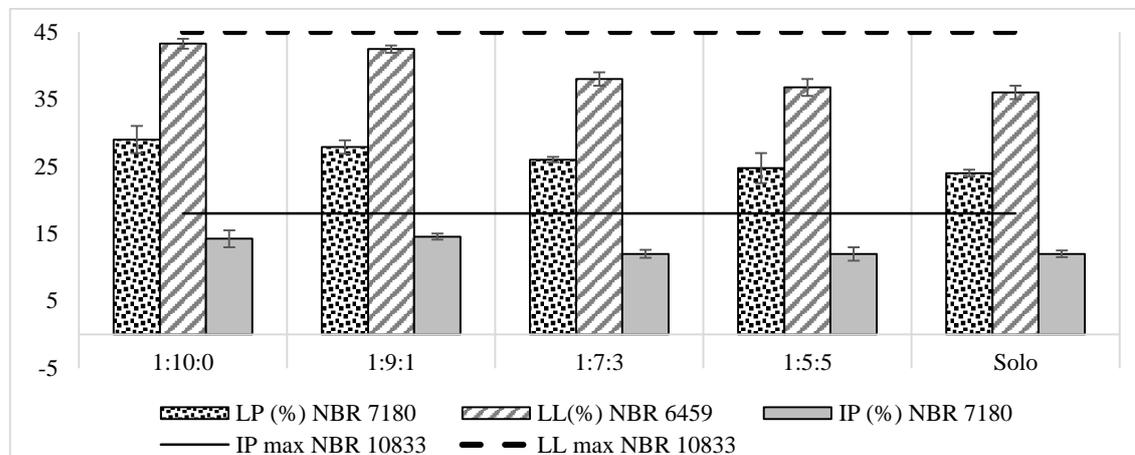


Figura 5.5: Limites de Atterberg para as misturas 1:10:0, 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5 e para o solo.

A caracterização ambiental realizada para o rejeito será apresentada posteriormente juntamente a dos tijolos.

5.3. Estudos de dosagem

A Figura 5.6 apresenta os resultados dos ensaios de compactação para o solo e para as misturas estudadas. Nota-se que a adição de solo ao rejeito promove acentuada redução do teor de umidade ótimo e significativo aumento da massa específica seca máxima (p_d) das misturas. É típico que para uma mesma energia de compactação, solos granulares apresentem maior redução do índice de vazios quando comparado a solos mais finos (PINTO, 2006).

Sendo assim, a medida que uma maior quantidade de solo é adicionada ao rejeito, as misturas passam a experimentar uma maior tendência de redução do seu índice de vazios. Esse comportamento, atrelado a uma diminuição da superfície específica a ser hidratada, contribui para um menor consumo de água durante o processo de compactação, o que implica na redução do teor de umidade ótimo e aumento da massa específica seca máxima.

Os traços 1:10:0 e 1:9:1 (cimento: rejeito: solo) apresentaram massa específica seca máxima (p_d) de 1,58 e 1,66g/cm³, respectivamente. A Tabela 5.5 traz uma classificação de solo em função desse parâmetro segundo o trabalho de Pacheco-Torgal e Jalali (2010). Nela, observa-se que os valores encontrados de p_d são menores que 1,76g/cm³, o que classificaria ambos os traços como não satisfatórios para alvenaria de construção em terra. As demais misturas apresentaram p_d entre 1,76 e 2,10g/cm³, o que as enquadra como muito satisfatórias para este fim. Entretanto, Villibor e Nogami (2009) relatam que em muitos casos os solos de climas tropicais não se encaixam nestas classificações preconizadas em literaturas internacionais. Em adição, Hallal, Sade e Najjar (2018)

consideram imaturo classificar solos finos como inadequados para a fabricação de tijolos tipo solo-cimento antes das análises de resistência à compressão simples e absorção de água.

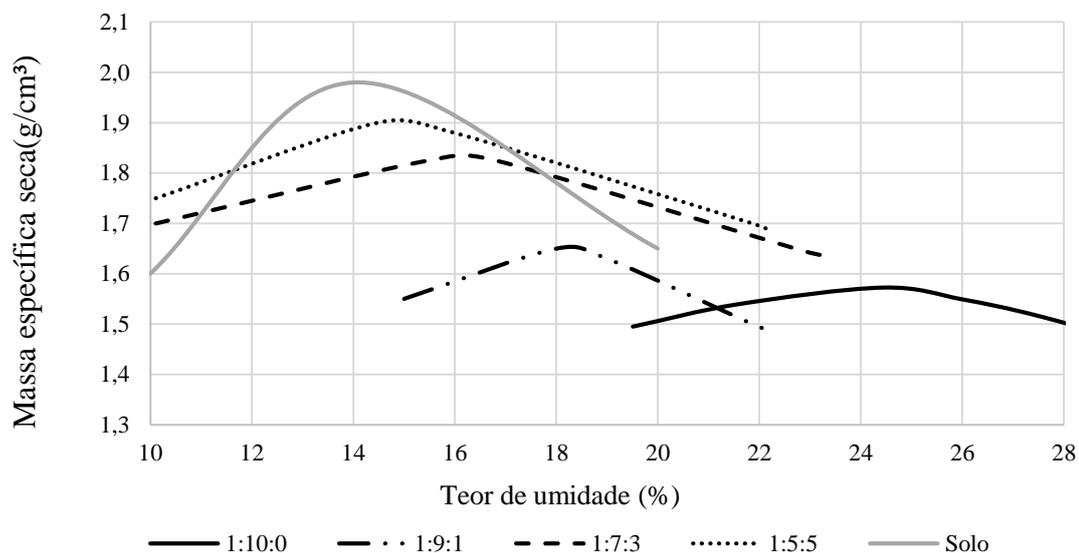


Figura 5.6: Estudo de dosagem/ Ensaio de compactação.

Tabela 5.5: Classificação do solo segundo a massa específica seca após compactação

Massa Específica seca (g/cm³)	Classificação do solo
> 1,76	Pouco satisfatório
1,76 – 2,10	Muito satisfatório
2,10 – 2,20	Excelente
2,20 – 2,40	Excepcional

Fonte: Adaptado de: Torgal e Jalali (2010).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados em corpos de prova cilíndricos serão discutidos juntamente aos realizados para os tijolos.

5.4. Caracterização dos tijolos

O ensaio de compactação permitiu a obtenção do teor de umidade ótimo e da massa específica seca de cada mistura, de modo que os tijolos fabricados fossem moldados nesse teor de umidade. Foram moldados 100 tijolos para cada mistura (1:10:0, 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5).

5.4.1 Caracterização segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012)

De cada mistura, 10 tijolos (triplicata) foram retirados aleatoriamente e tiveram as suas dimensões averiguadas, e como resultado, segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012), todos eles se enquadram como tijolo de solo-cimento vazado tipo A (20cm de comprimento c , 10cm de largura l e 5cm de altura h), com 5,1cm ($\sigma = 0,3$) de diâmetro de furo e 5,0cm ($\sigma = 0,8$) de distância entre os furos como mostra a Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Caracterização dos tijolos de solo-cimento segundo a NBR 8491

Parâmetros	NBR 8491 (ABNT, 2012)	Mistura					
		1:10:0	1:9:1	1:7:3	1:5:5		
c (cm)	Máximo	21,0	20,7	20,5	20,1	20,0	
	Mínimo	19,0	19,2	19,3	19,5	19,8	
Análise dimensional (Valores individuais)	l (cm)	Máximo	11,0	10,6	10,5	10,2	10,0
		Mínimo	9,0	9,1	9,6	9,8	9,8
h (cm)	Máximo	6,0	5,9	5,8	5,7	5,7	
	Mínimo	4,0	4,2	4,9	4,9	5,0	
Resistência à compressão	Mínimo individual (MPa)	1,7	0,9	1,8	2,5	2,9	
	Média 7 CPs (MPa)	2,0	1,2	2,0	2,6	3,1	
Absorção de água	Máximo individual (%)	22,0	25,0	21,9	19,2	18,4	
	Média 3 CPs (%)	20,0	22,0	19,8	18,4	17,9	

Também pela NBR 8491 (ABNT, 2012), dos 10 tijolos escolhidos para cada mistura, 7 devem apresentar a média mínima de resistência à compressão de 2,0MPa, sendo que o valor individual não deve ser inferior a 1,7MPa. Os outros 3 passam pela análise de absorção de água cuja média deve ser no máximo 20% e 22% para valor individual. A Figura 5.7 ilustra os resultados obtidos para os parâmetros normatizados por esta normativa após 28 dias. A linha tracejada escura marca o valor mínimo esperado de resistência a compressão de 2MPa, e as colunas escuras, a média de cada mistura. Já a linha tracejada clara contém os 20% máximos de absorção de água, enquanto as colunas claras, o valor médio de cada composição feita. Dessa forma, os valores compreendidos entre as duas linhas tracejadas constituem os valores aceitáveis pela norma técnica.

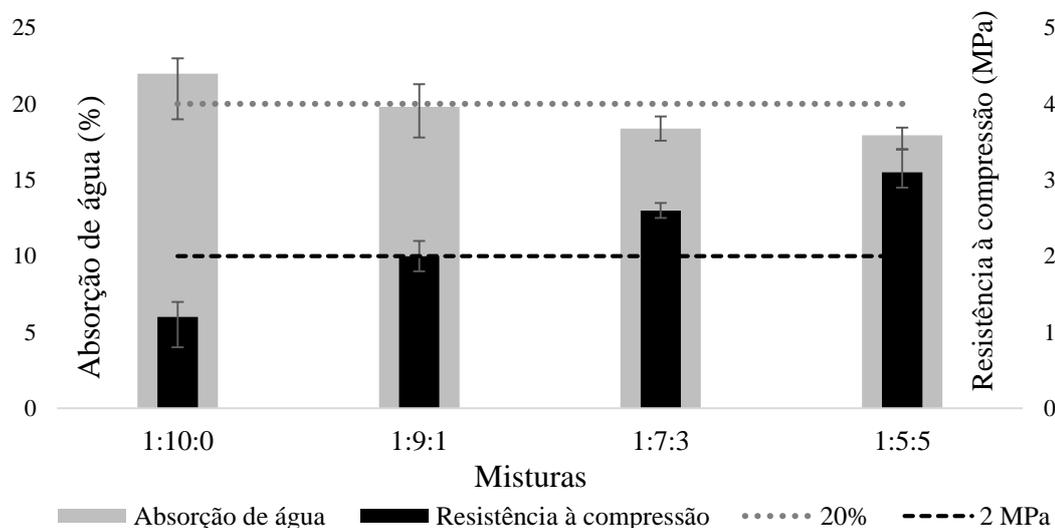


Figura 5.7: Caracterização dos tijolos segundo valores de resistência à compressão e absorção de água após 28 dias de cura.

A mistura 1:10:0 alcançou 1,2MPa (f_t) e 22% (A), sendo reprovada segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012). O traço volumétrico 1:9:1 teve um aumento na sua resistência e diminuição da porosidade com o acréscimo de solo, chegando a 2,0MPa (f_t) e 19,8% (A). Já a mistura 1:7:3 obteve resultados ainda mais favoráveis, 2,6MPa (f_t) e 18,38% (A). Dentre todas as composições estudadas, a mistura 1:5:5 alcançou o maior valor de f_t (3,1MPa) e o menor de A (17,04%).

Apenas a primeira mistura 1:10:0, não atendeu às especificações da NBR 8491 (ABNT, 2012); enquanto as demais proporções respeitaram o valor mínimo de resistência à compressão (f_t) e máximo de absorção de água (A). Conforme os trabalhos publicados por Pinto (2006), Roy Adhikari e Gupta (2007) e Nagaraj e Shreyasvi (2017), a adição de solo (frações mais grossas) ao rejeito aumenta o grau de empacotamento dos grãos, diminuindo assim a porosidade do tijolo, e, como consequência, a absorção de água é menor. Mansour *et al.* (2016) e Mansour *et al.* (2017) demonstraram que a pressão de prensagem na produção de tijolos tipo solo-cimento tem uma importante influência na densidade do tijolo, que por sua vez, tem impacto direto nas suas propriedades mecânicas. Neste trabalho uma única prensa manual foi utilizada. Outros equipamentos, em especial os hidráulicos (pressão de prensagem maior que 6 toneladas), são capazes de aumentar a resistência à compressão dos tijolos de misturas propostas. Também como sugestão, uma maior proporção de cimento provavelmente melhorará a resistência mecânica dos mesmos. Dessa forma, misturas com maiores porcentagens de solo e estabilizante, bem como uma maior pressão de prensagem na sua fabricação, têm potencial para propiciar maior f_t e menor A.

Para comparar os resultados do rompimento de corpos de provas cilíndricos através das orientações da NBR 12025 (ABNT, 2012), 7 tijolos de cada lote e mistura foram rompidos após 7 dias de cura. Assim, a Figura 5.8 compara os resultados de resistência à

compressão após 7 dias da moldagem dos corpos de prova (CPs) cilíndricos e dos tijolos de solo-cimento. Observa-se que, de modo análogo aos resultados obtidos após 28 dias em câmara úmida, quanto maior a fração solo, maior a capacidade mecânica do composto de solo-cimento. Entretanto, ainda que moldados no mesmo traço, tempo e condição de cura, os corpos de prova cilíndricos alcançaram maiores valores de resistência a compressão (f_t) que os tijolos. O CP de traço 1:5:5 apresentou $f_t > 2,0\text{MPa}$, enquanto o tijolo obteve um resultado de 1,5MPa. Grande (2003) e Souza Segantini e Pereira. (2007) demonstraram que, para um mesmo traço, a resistência do corpo de prova cilíndrico é maior que a resistência do tijolo produzido. O próprio processo de moldagem e compactação dos CPs (realizado em três camadas sucessivas com aplicação de energia constante e uniforme), favorece melhores resultados mecânicos. A energia aplicada para a confecção dos CPs foi a de compactação (golpes); já os tijolos não foram compactados, e sim, prensados. Dessa forma, os resultados obtidos através da análise de resistência a compressão sugeridos pela NBR 12025 (ABNT,2012) auxiliam na caracterização de compostos solo-cimento, mas não podem ser aplicados diretamente para os tijolos de solo-cimento.

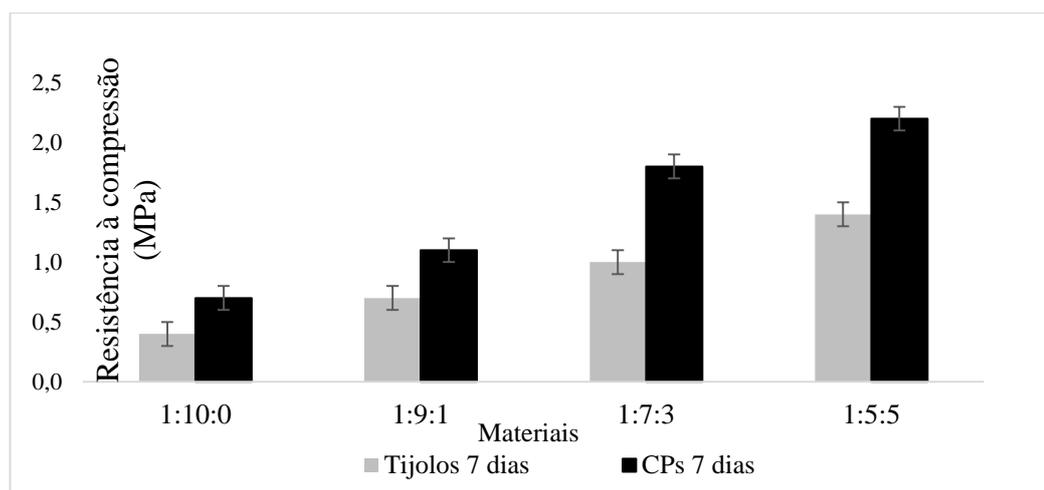


Figura 5.8: Resistência à compressão dos compostos de solo-cimento após 7 dias de cura.

5.4.2 Caracterização de durabilidade

Os ensaios de durabilidade realizados por meio de determinação de perda de massa após ciclos de molhagem e secagem apresentaram os resultados expostos na Tabela 5.7. Observa-se que de forma similar aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e estudos de dosagem, quanto maior a porcentagem de solo, mais satisfatórios os resultados obtidos.

Segundo a NBR 13554 (ABNT, 2012) os tijolos tipo solo-cimento não devem apresentar perda de massa superior a 7% no ensaio de durabilidade. Dessa forma, o traço 1:10:0 obteve o pior resultado (3%) e a mistura 1:5:5, o melhor (0,9%), todas as proporções testadas estão em conformidade com a normativa.

Tabela 5.7: Ensaio de durabilidade dos tijolos de solo-cimento

Tijolo de mistura	Perda de massa (%) + σ
1:10:0	3,0 + 0,10
1:9:1	2,3 + 0,10
1:7:3	1,3 + 0,08
1:5:5	0,9 + 0,04

No presente estudo não houve variação da quantidade de estabilizante; entretanto, para a ABCP (2002), o acréscimo do teor de cimento ocasiona redução de perda de massa nos ensaios de durabilidade. Para misturas com baixos teores de estabilizante, seu acréscimo provoca uma considerável redução na perda; enquanto que, para teores elevados, o acréscimo de cimento provoca uma pequena diminuição na perda de massa.

Também correlacionado aos resultados obtidos, e já discutido, solos granulares apresentem maior redução do índice de vazios quando comparado a solos mais finos (PINTO, 2006). Assim, na medida que uma maior quantidade de solo é adicionado ao rejeito, as misturas passam a experimentar um melhor encaixe dos grãos, o que explica os traços com maior porcentagem de solo terem apresentado uma melhor durabilidade.

5.4.3 Caracterização ambiental, química, mineralógica e morfológica

Ainda que o uso de rejeitos vá ao encontro dos princípios da economia circular, estes apresentam características de periculosidade distintas em função da sua geologia e processamento aos quais foram submetidos. Pode-se dizer que cada rejeito de mineração tem características únicas. Dessa forma, além do rejeito, as misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 foram caracterizadas pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Estas misturas foram escolhidas por atenderem às especificações da NBR 8491 (ABNT, 2012) e utilizarem uma maior quantidade de rejeito dentro de uma visão de economia circular como defendida por Zhang (2013) e Tayebi-Krorami *et al.* (2019), diminuindo assim, o passivo ambiental da indústria mineral.

Assim, sobre a caracterização ambiental, o rejeito e os traços 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 foram classificados na categoria II A – não perigosos e não inertes pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Os materiais foram identificados como “não perigosos” porque não apresentam as características de inflamabilidade (reação violenta com a água), corrosividade (propriedades altamente ácidas ou básicas), reatividade (liberação elevada de enxofre ou cianeto), toxicidade (contaminantes acima dos pré-determinados pelo anexo F da norma) e patogenicidade (grau de capacidade patogênica) definidas pela norma técnica. Todavia, ainda que “não perigosos”, os mesmos foram classificados como “não inertes”, por apresentarem concentrações de alguns elementos químicos acima do limite estipulado. Ser inerte diz respeito a interação direta de um determinado material com o meio ambiente. Um material inerte, exposto às intempéries, não libera espécies que possam contaminar o solo ou corpos d’água através da lixiviação ou solubilização de compostos químicos.

A Tabela 5.8 apresenta os parâmetros aprovados na caracterização ambiental, segundo a NBR 10005 (ABNT, 2004), onde, para o rejeito e para as misturas estudadas, todos os parâmetros determinados no lixiviado foram inferiores ao estipulado pela norma. Também estão representados os parâmetros orgânicos e inorgânicos encontrados na concentração dos resíduos solubilizados aprovados pela NBR 10006 (ABNT, 2004). Dentre todos eles, vale ressaltar a baixa concentração de mercúrio, comumente utilizado na recuperação do ouro; e do arsênio, constituinte da arsenopirita, sulfeto frequentemente associado ao ouro, a pirita e a calcopirita, minerais identificados para o rejeito conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.8: Caracterização ambiental- parâmetros aprovados para o rejeito e traços 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5

Caracterização de extrato lixiviado - NBR 10005 (ABNT, 2004)	
Parâmetros abaixo do valor máximo permitido	As, Ba, Cd, Pb, Cr, F, Hg, Ag, Se
Parâmetros que extrapolam o valor máximo permitido	-----
Caracterização de extrato solubilizado - NBR 10006 (ABNT, 2004)	
Parâmetros inorgânicos abaixo do valor máximo permitido	As, Ba, Cd, Pb, Cl, Cu, Fe, Mn, Hg, N, Ag, Se, Na, Zn
Parâmetros orgânicos abaixo do valor máximo permitido	Fenóis Totais, surfactantes

Já a tabela 5.9 detalha aqueles elementos cujas concentrações que foram reprovadas pela NBR 10006 (ABNT, 2004). Observa-se que, ainda que classificado como não perigoso, o rejeito extrapola o valor máximo permitido para a liberação de cianeto, alumínio, cromo total, fluoretos e sulfato. Dentre estes, destaca-se a concentração de cianeto em que a norma preconiza igual 0,070 mg CN/L, enquanto foi encontrado 0,118 mg CN/L. Estes resultados indicam a necessidade de misturas onde as concentrações máximas desses parâmetros sejam respeitadas. A Tabela 5.9 também evidencia que a simples adição de cimento e solo permite que este limite seja alcançado. Entretanto, para as misturas 1:9:1 e 1:7:3 os valores encontrados foram de 0,018 e 0,009 CN/L; a concentração de cianeto ficou abaixo do limite detectável para a mistura 1:5:5. O Anexo IV contém o laudo emitido pela SGS Geosol para o tijolo de traço 1:5:5 e para o rejeito.

Para Zhang (2013) e Metha e Monteiro (2014), a adição de cimento Portland forma uma matriz sólida que ocorre devido à hidratação dos silicatos no cimento, gerando silicatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados (ou produtos C-S-H e C-A-S-H). Os produtos de hidratação estão relacionados ao ganho de resistência mecânica do cimento e ao preenchimento de espaços vazios, contribuindo também para baixos valores de absorção de água. Silva *et al.* (2007), Kulakowski *et al.* (2016) e Braz *et al.* (2018) relatam que esta matriz sólida formada imobiliza os contaminantes, estabilizando, assim, o cianeto. Dos agentes ligantes inorgânicos, o cimento Portland tem tido a maior diversidade de aplicação para encapsulamento de diferentes resíduos perigosos. Brehm *et al.* (2013) reportam que quanto maior a proporção de clínquer no cimento Portland, maior a eficiência na estabilização de contaminantes tóxicos. Para Vaidya *et al.* (2010) os

aglutinantes são essenciais para restringir a lixiviação de cianetos residuais pois, além da geração de fases minerais, os mesmos diminuem a porosidade do material, o que favorece a sua estabilização. Silveira *et al.* (2003) relataram um sistema de estabilização à base de cimento para resíduos industriais contendo cianeto sem qualquer pré-tratamento para sua remoção.

Tabela 5.9: Caracterização ambiental- parâmetros reprovados para o rejeito e traços 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5

Caracterização de extrato solubilizado - NBR 10006 (ABNT, 2004)						
Parâmetro	Método Analítico	Valor máximo	Concentração no extrato solubilizado (mg/L)/ Material			
	SMEWW ¹¹	permitido (mg/L)	Rejeito	1:9:1	1:7:3	1:5:5
Cianeto (mg CN/L)	4500 CN-, B, C, D	0,07	0,118	0,018	0,009	<0,002
Alumínio (mg Al/L)	3030, 3120 B	0,2	21,0	21,35	14,0	5,66
Cromo Total (mg Cr/L)	3030, 3120 B	0,05	0,11	0,11	0,10	0,04
Fluoretos (mg F/L)	4110 B	1,5	7,3	7,29	3,7	<0,050
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	4110 B	250	540	319	225	57,43

Nota-se também que quanto maior a adição de solo na mistura, menores as quantidades de cromo total, alumínio, fluoreto e sulfato presentes no tijolo. O rejeito apresentou menor quantidade de Al que o tijolo de mistura 1:9:1. Isso se deve à adição de cimento nas composições. Sobre as demais misturas, quanto maior a fração rejeito, maior a quantidade de alumínio solubilizado devido a maior proporção de argilominerais naturais (provenientes da rocha matriz beneficiada) constituídos por Si, Al, Fe, Na, K e Mg (KLEIN; DUTROW, 2012).

Vale comentar que a caracterização ambiental de solos segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) não é comum devido à resolução CONAMA 307 (2002) que considera o solo como um material reutilizável. Dessa forma, a fabricação de tijolos tipo solo-cimento sem adição de materiais secundários, como rejeito de mineração, por exemplo, dificilmente contempla uma análise dos extratos lixiviado e solubilizado. Consequentemente, estes tijolos são passíveis de terem estes elementos em quantidades maiores do que as normatizadas.

A Tabela 5.4 evidencia que o solo e o rejeito possuem teores próximos de Al, 27,03 e 29,54%, nessa ordem; enquanto a Tabela 5.9 evidencia que, quanto maior a fração de rejeito no tijolo, maior a solubilização de alumínio. Ritcey (2005) explica que, minerais sulfetados, típicos de ambientes geológicos auríferos, tais como a pirita (FeS₂) e a calcopirita (CuFeS₂), sob ação de intempéries, podem expor à atmosfera os sulfetos confinados que, ao entrarem em contato com a água e o ar, podem sofrer oxidação. Os

¹¹ SMEWW = *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*

produtos da oxidação dos sulfetos (sulfatos de ferro) apresentam expressiva solubilidade podendo ser liberados na fase líquida, acidificando inclusive as águas de drenagem. Como consequência dos baixos valores de pH, elementos tais como Al, As, Cd, Cu, Hg, Mn, Pb e Zn também podem ser solubilizados.

Dentre todas as misturas avaliadas, destaca-se o tijolo com adição de 50% de solo (traço 1:5:5) por alcançar valores aceitáveis para a concentração de cianeto, cromo total, fluoretos e sulfato. Porém, o mesmo é avaliado como não inerte devido à alta concentração de alumínio. Entretanto, acredita-se que o teor de Al solubilizado encontrado (Tabela 5.9) não seja impedimento para que os tijolos fabricados sejam utilizados em alvenaria.

Cagnon *et al.* (2018) apontaram, através da caracterização de quatro amostras de solo da cidade de São Paulo, a inadequabilidade da utilização da NBR 10004 (ABNT, 2004). Isso porque espera-se que o solo seja classificado na Classe II B, não perigoso e inerte (a resolução CONAMA 207 considera o solo um material reutilizável). Todavia, os autores demonstraram que os solos avaliados apresentavam no extrato solubilizado concentrações de Al e Fe acima do normatizado, devido às suas composições minerais naturais, pertencendo então, a Classe II A, não perigosos e não inertes. Dessa forma, as características intrínsecas dos solos brasileiros, podem ser suficientes para que os valores máximos permitidos pelas normativas de solubilização e lixiviação sejam alcançadas. Os autores também discutem sobre a escassez de trabalhos e metodologias a nível nacional e internacional que contemplem estratégias específicas para a caracterização e classificação de solos naturalmente contaminados.

Pablos *et al.* (2009) incorporaram um resíduo sólido gerado por areia de fundição na fabricação de cimento utilizado na produção de tijolos de solo-cimento. Os tijolos apresentaram, no extrato solubilizado, Cr acima máximo estipulado, contudo, os pesquisadores discorrem sobre a inexistência de publicações que estabeleçam restrições quanto ao desempenho químico de matrizes solidificadas. Lima e Cabral (2013) publicaram um estudo em que foram avaliados parâmetros químicos de resíduos de construção civil (RCC), considerados reutilizáveis, na cidade de Fortaleza. Como resultado, foram encontradas teores acima dos previstos no extrato solubilizado para Al, Cr, Pb e SO₄. Os autores acreditam que a alta concentração de Al esteja relacionada ao óxido de alumínio presente em cimentos Portland, visto que argamassas e concretos fazem parte dos RCC. Ulsen *et al.* (2010) também detectaram o alto teor de alumínio em RCC na cidade de São Paulo devido à presença de cerâmica vermelha descartada. Bitencourt (2004) fabricou tijolos cerâmicos com solo argiloso e resíduo de olaria na cidade de Joinville que foram reprovados pela NBR 10004 (ABNT, 2004) devido ao alto teor de Al. Todavia, o alumínio solubilizado é proveniente da composição natural do solo que é composto, principalmente, por argilominerais. Pinheiro (2009) afirma que a alta concentração de alumínio detectada no grês porcelanato estudado não representa inconveniências do ponto de vista sanitário, visto que este elemento faz parte da composição das principais matérias-primas utilizadas para a fabricação de massas cerâmicas. Herek *et al.* (2005) caracterizaram tijolos cerâmicos feitos com 10% de resíduo sólido da indústria têxtil que também foram considerados não inertes devido ao alto teor de Al. No entanto, os autores alegam que a finalidade do estudo foi avaliar a utilização dos tijolos na construção civil, os quais terão destino e condições de intempéries diferentes daqueles encontrados para os resíduos. A NBR 10004 (ABNT,

2004) diz respeito a classificação de resíduos sólidos para a sua disposição, e não para o seu aproveitamento em outros setores.

Acerca da discussão realizada, tijolos com maiores proporções de cimento na sua composição, ou cimentos com maior percentual de clínquer, como o CPI ou CPV-ARI (Quadro 4), favoreceriam a formação de produtos C-S-H e C-A-S-H com potencial para uma maior estabilização dos contaminantes. Entretanto, essas são alternativas que aumentariam o custo de fabricação dos mesmos. Uma maior adição de solo tampouco seria vantajosa, uma vez que o maior interesse do presente trabalho é a destinação do rejeito que corresponde a um passivo ambiental. Dentre todos os materiais avaliados, destaca-se o tijolo com adição de 50% de solo (mistura 1:5:5), ainda que seja Classe II A – não perigoso e não inerte, devido a solubilização de Al maior que a normatizada pela NBR 10006 (ABNT, 2004).

Assim, os tijolos de mistura 1:5:5 foram analisados por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X. A Figura 5.9 mostra, da esquerda para a direita, a grande área analisada com os pontos que foram submetidos à análise EDS. Os elementos encontrados O, Si, Al, Fe, K, Mg, S e Ti são comuns para o rejeito e para o solo (Tabela 5.4). A presença de C deve-se à preparação da amostra onde há o recobrimento da mesma com carbono. Já a presença de Ca é explicada pela adição de cimento, cuja matéria-prima principal é o calcário.

Em relação as fases cristalinas encontradas na análise DRX, o quartzo já havia sido observado tanto para o rejeito quanto para o solo (Tabela 5.3). Já a identificação da calcita pode ser justificada pelo alto teor de cálcio na composição do cimento, que ao entrar em contato com o ar passa por processo de carbonatação (METHA e MONTEIRO, 2014; BRAZ *et al.*, 2018; SCHEINHERROVÁ, 2019).

Além do quartzo e da calcita, também foram encontradas fases C-S-H e C-A-S-H resultantes da hidratação do cimento. A primeira foi identificada em um silicato de cálcio e manganês hidratado, chamado inesita, de composição $\text{Ca}_2(\text{Mn}^{2+})_7\text{Si}_{10}\text{O}_{28}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Enquanto a segunda foi encontrada na observação da paragonita, um aluminossilicato de sódio de fórmula química $\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Metha e Monteiro (2014), Braz *et al.* (2018) e Scheinherrová (2019) observam que o processo de hidratação do cimento é considerado complexo, e, os produtos C-S-H e C-A-S-H formados têm uma grande variação nas suas composições químicas e podem ser quase amorfos, o que dificulta a sua identificação em análises DRX.

Foram observadas microestruturas com morfologia fibrosa com dimensões inferiores a $5\mu\text{m}$ (área 1), esponjosa com dimensões da ordem de $5\mu\text{m}$ (área 2) e granular (área 3) de tamanhos próximos a $8\mu\text{m}$. Segundo Metha e Monteiro (2014), Fonsêca (2018) e Souza (2019), as morfologias fibrosa e esponjosa podem estar relacionadas aos produtos C-S-H e C-A-S-H. As análises EDS dos pontos 1 e 2 detectam a presença de Ca, Al e Si, corroborando, assim, com a identificação dos produtos de hidratação do cimento.

Em resumo, o tijolo de mistura 1:5:5 alcançou as especificações da NBR 8491 (ABNT, 2012) para resistência à compressão ($f_t = 3,1\text{MPa}$) e absorção de água ($A = 17,4\%$) e foi classificado como não perigoso e não inerte devido ao alto teor de alumínio solubilizado. As análises química, mineralógica e morfológica para esta mistura (Figura 5.9) indicam a formação de fases de hidratação do cimento C-S-H e C-A-S-H que justificam o ganho

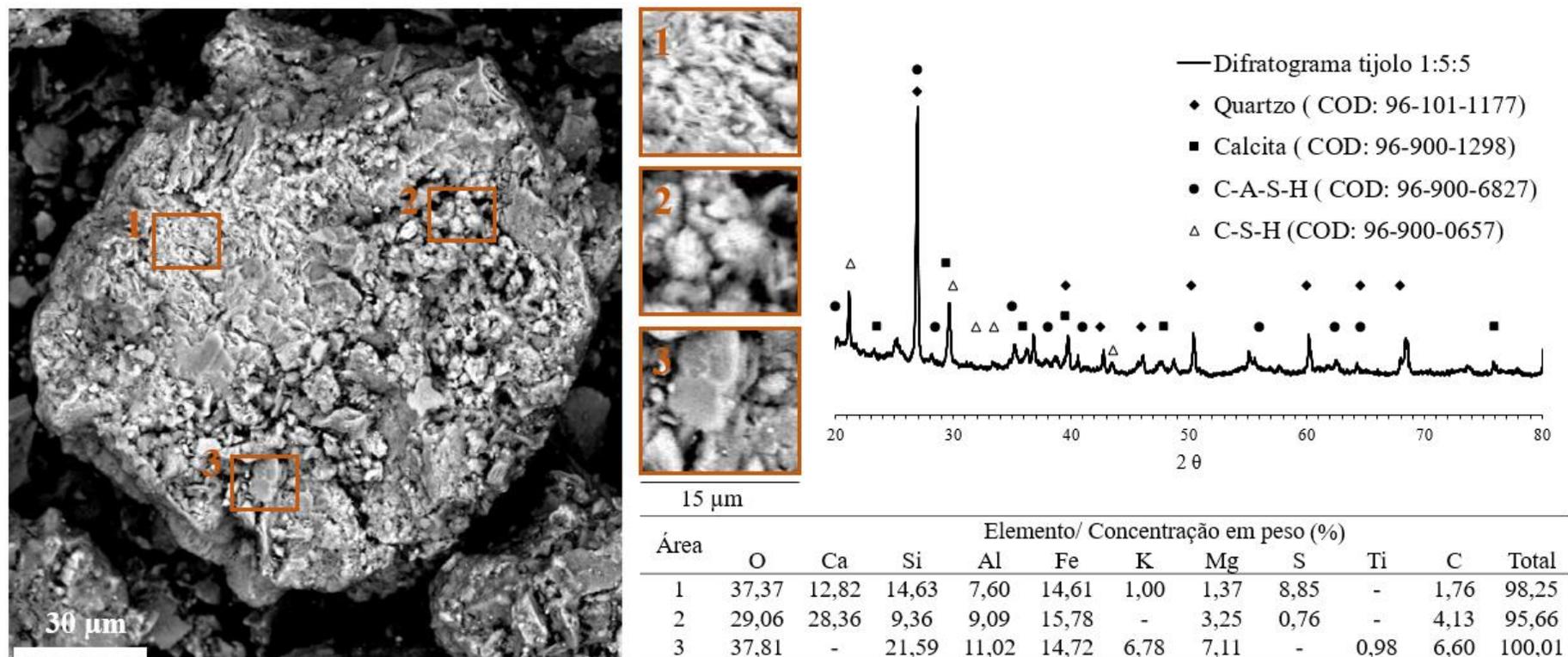


Figura 5.9: Análise química, mineralógica e morfológica dos tijolos de mistura 1:5:5.

de resistência mecânica do cimento, o preenchimento de espaços vazios (que diminuem os valores de absorção de água) e imobilizam contaminantes tais como o cianeto.

Para uma melhor investigação da origem do alumínio nos tijolos, uma análise complementar termoanalítica foi realizada. Acredita-se que o rejeito possua mais argilominerais que o solo devido a relação direta da granulometria e da composição química destes minerais. A fração argila, definida pela NBR 6502 (ABNT, 1995), corresponde as partículas inferiores a $2\mu\text{m}$, e segundo Klein e Dutrow (2012), é, geralmente, constituída de argilominerais, que, por sua vez, são compostos por silicatos de alumínio hidratados, com a presença de outros elementos químicos. A Tabela 5.2 mostra que enquanto o rejeito possui 21% de argila na sua composição granulométrica, o solo possui apenas 8%.

Dessa forma, as Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as curvas resultantes das análises termogravimétrica (TGA) e térmica diferencial (DTA) simultâneas do rejeito e do solo, nessa ordem, que foram delimitadas por eventos ou etapas. Observa-se que a perda de massa total foi de 11,12%. No primeiro e no segundo evento, ocorreram dois picos endotérmicos, próximo aos 50 e 120°C , correspondentes à eliminação de água higroscópica do material, responsável pela perda de massa de 2,92%. Segundo Duval (1963) a desidratação do argilomineral gibbsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ acontece de forma lenta, iniciando por volta dos 72°C e finalizando em 320°C (1° , 2° e 3° eventos). Na terceira etapa, destaca-se um pico endotérmico próximo aos 270°C que, segundo Duval (1963) e VIEIRA *et al.* (2007), está associado à decomposição de hidróxidos de ferro e alumínio, responsável pela perda de massa de 2,06%. Cavalcanti Filho (2016) reporta que a perda de massa observada entre 320 e 550°C pode estar relacionada a perda de água estrutural do argilomineral caulinita $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$. No quarto evento a perda de massa de 3,78% está associada aos picos de DTA entre 600 e 700°C . Este resultado pode ser atribuído à eliminação de água de constituição de mineral micáceo (tais como a muscovita $[\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2]$) ou de grupos de hidroxilas remanescentes de minerais argilosos (VIEIRA *et al.*, 2007). O pico exotérmico observado em 475°C pode representar a oxidação de minerais contendo ferro, tais como hematita (Fe_2O_3) e goethita $[\text{FeO}(\text{OH})]$ (DUVAL, 1963).

As três etapas identificadas da Figura 5.11 também apresentaram perda de massa com o aumento de temperatura, sendo a perda de massa total de 8,55%, menor que a observada para o rejeito. Os picos endotérmicos em 120 e 270°C , associados à decomposição de hidróxidos de ferro e alumínio, não foram observados para o solo. O pico exotérmico encontrado para o rejeito em 475°C , tampouco foi identificado para o solo. Por outro lado, o pico endotérmico em 550°C , está relacionado com a perda de massa estrutural da caulinita e foi observado com maior intensidade.

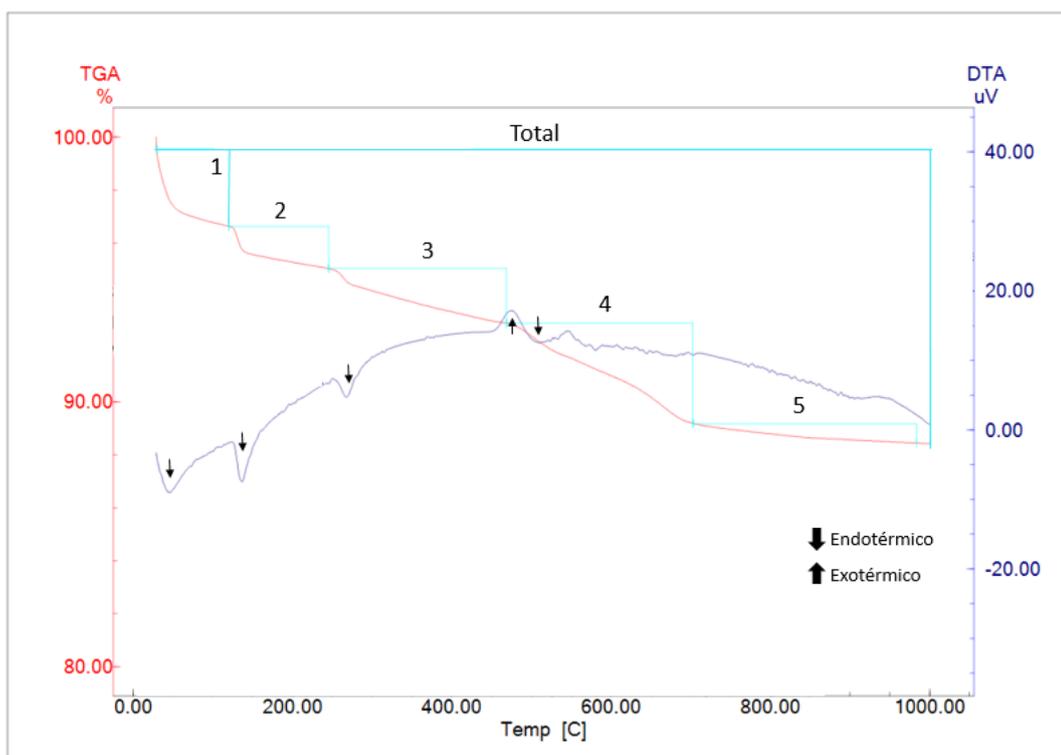


Figura 5.10: Curvas de análise térmica para o rejeito.

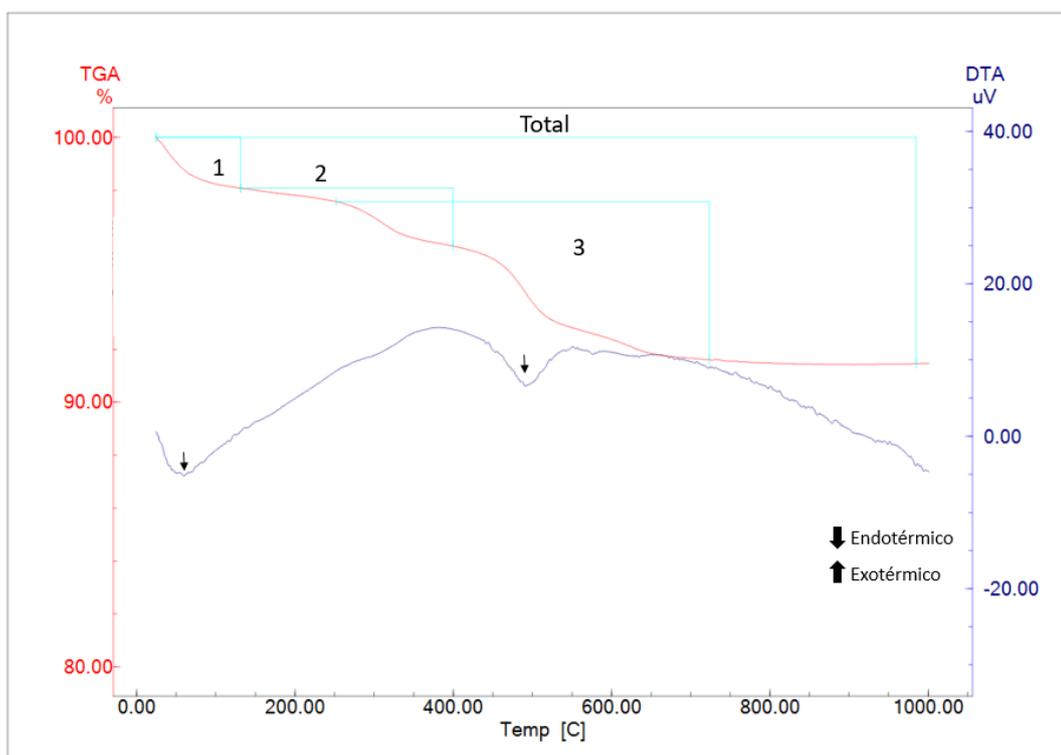


Figura 5.11: Curvas de análise térmica para o solo.

Já a Figura 5.12 contém as TGA do rejeito, solo, e dos tijolos produzidos nas misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5. Observa-se que os tijolos tiveram maior perda de massa do que as matérias-primas de origem; essa informação também está contida na Tabela 5.10, que ademais das perdas de massa totais para cada material avaliado, contém as temperaturas iniciais e finais dos testes realizados. Para Duval (1963) e Barreto (2020), a perda de massa mais acentuada, para os tijolos, entre 400 e 500°C, além da desidroxilação da caulinita, pode corresponder a desidratação do hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Em adição, a perda de massa entre 650 a 780°C pode estar associada a decomposição térmica da calcita (CaCO_3), mineral não encontrado para o rejeito nem para o solo, mas encontrado no tijolo de traço 1:5:5 (justificado pela carbonatação do cálcio encontrado na composição química do cimento).

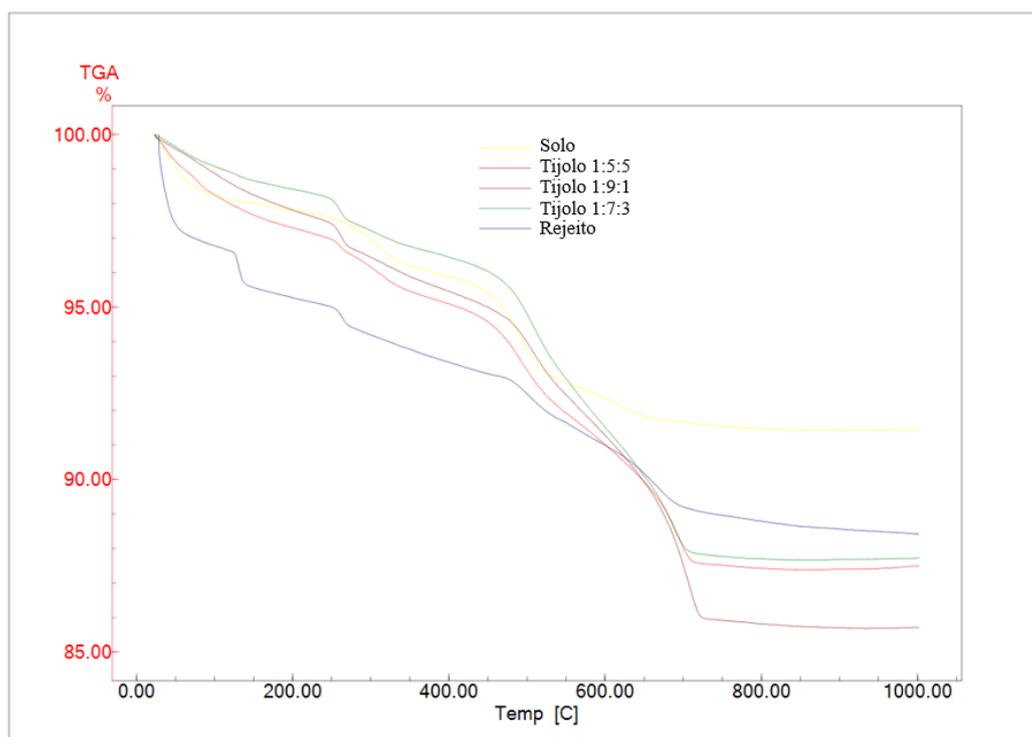


Figura 5.12: Curvas de análise térmica TGA para o rejeito, solo e tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5.

Tabela 5.10: Dados da análise termogravimétrica do rejeito, solo e tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5

Material	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Perda de massa total (%)
Rejeito	29,17	1000,00	11,12
Solo	24,49	984,69	8,56
Tijolo 1:9:1	26,66	992,17	14,18
Tijolo 1:7:3	25,04	967,57	12,24
Tijolo 1:5:5	26,30	981,35	12,44

A Figura 5.13 apresenta as curvas DTA para o rejeito, o solo, e os tijolos produzidos nas misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5, onde é possível perceber uma semelhança em todas as etapas de aquecimento; assim como observado na Figura 5.12, quanto maior a proporção de rejeito nas misturas, mais as curvas se assemelham as curvas termogravimétricas obtidas para o rejeito. É importante ressaltar que as análises térmicas TGA e DTA estão em concordância com as análises de DRX (Tabela 5.3) e FRX (Tabela 5.4) realizadas.

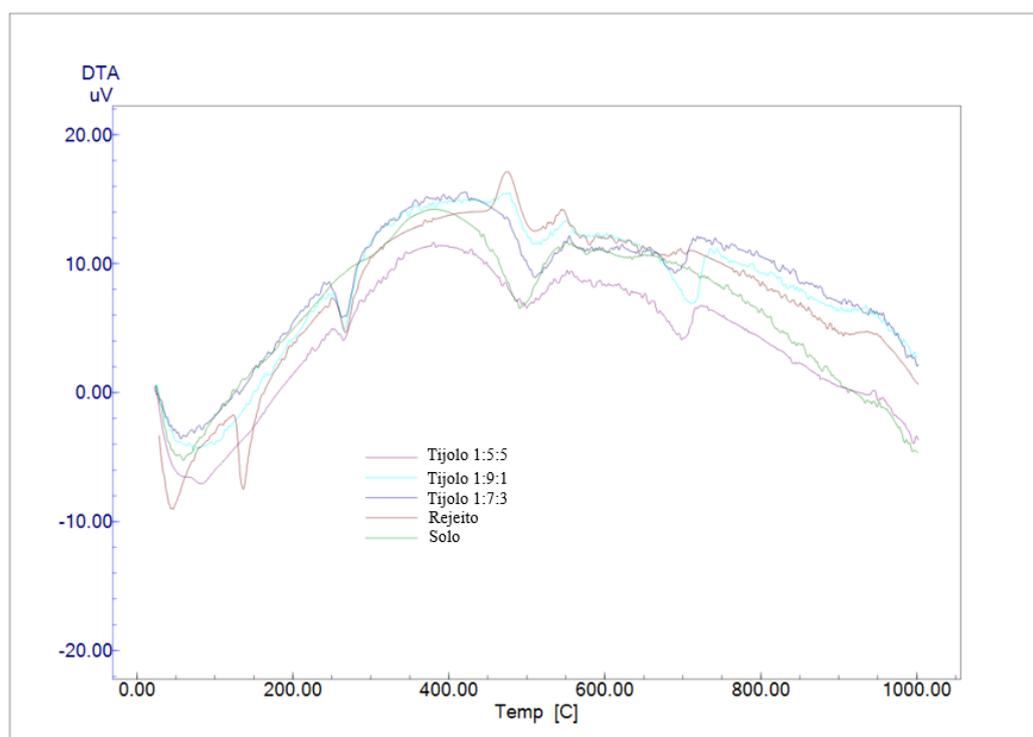


Figura 5.13: Curvas de análise térmica DTA para o rejeito, solo e tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5.

A Figura 5.14 compara os espectros de infravermelho obtidos para o rejeito, solo e os tijolos de traço 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5, em que é possível observar que as bandas de vibração

para estes materiais são bastante similares. Os principais picos e espectros correspondentes aos grupos funcionais estão listados na Tabela 5.11.

Sobre as principais bandas de vibração identificadas nos espectros de vibração em todos os materiais analisados, as regiões de número de onda ~ 3697 e 3621cm^{-1} estão relacionadas à vibração de estiramentos (-OH) representando os grupos funcionais referentes a argilominerais tais como a caulinita. Já o pico observado em $\sim 3439\text{cm}^{-1}$ no modo de vibração estiramento amplo de (-OH) representa moléculas de água. Os picos ~ 1170 e 1032cm^{-1} foram atribuídos ao grupo dos silicatos de alumínio dos minerais de argila com vibrações de estiramento C-O-C, Al-O-Si e Si-O-Si. Os picos ~ 914 , 790 , 692 e 540cm^{-1} estão correlacionados a presença de minerais de argila e quartzo representados pelas vibrações C-H deformados, O-H deformados e estiramentos de Si-O (PAVIA *et al.*, 2010; PADILHA *et al.*, 2017; RIVEIRA *et al.*, 2020).

Godoy *et al.* (2020) adicionam que a banda de absorção observada em 1650cm^{-1} corresponde à vibração de flexão das moléculas de água quimicamente associadas ao $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Observa-se também na Figura 5.14 uma banda de vibração em $\sim 1420\text{cm}^{-1}$ presente apenas para os tijolos produzidos, sendo este é o único pico identificado que difere dos espectros das matérias-primas. Para Riveira *et al.* (2020), as bandas no espectro de infravermelho em torno de 1019 e 1420cm^{-1} podem ser oriundas de sinais de vibração de alongamento de ligação dupla de compostos amorfos Al=O. Já para Pavia *et al.* (2010), picos fracos e largos na região entre 1440 e 1220cm^{-1} estão relacionadas a vibrações de dobramento C-O-H acopladas a vibrações de dobramento H-C-H. Piqué e Vázquez (2012) avaliaram espectros de infravermelho para detectar fases de hidratação do cimento. As autoras identificaram picos na região de 3600cm^{-1} correspondentes ao hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), picos entre 1350 - 1550cm^{-1} que se devem ao carbonato de cálcio, e pequenos picos entre 970 - 1428cm^{-1} correspondentes a formação de silicatos de cálcio hidratado, ou fases C-S-H.

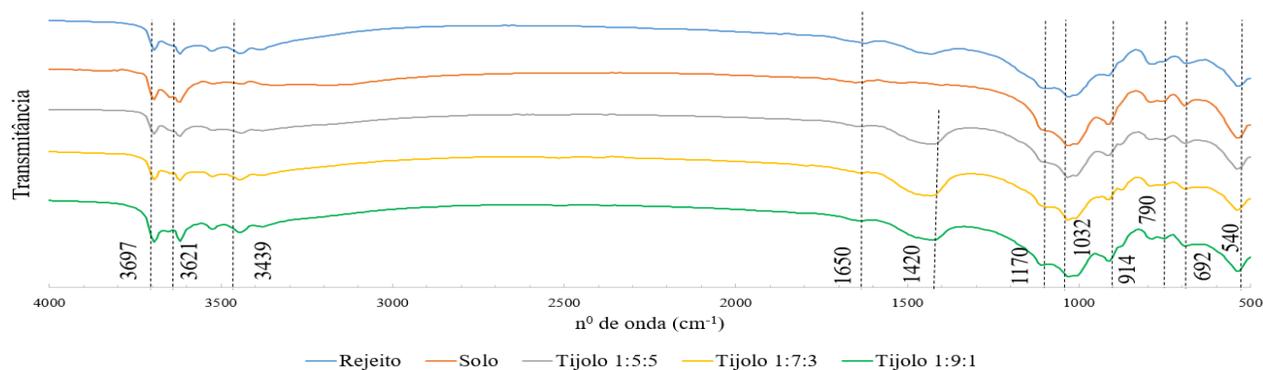


Figura 5.14: Espectros observados através da análise de FTIR do rejeito, solo e tijolos de traço 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5.

Tabela 5.11: Principais picos dos espectros de FTIR e seus respectivos grupos funcionais

Comprimento de onda (cm ⁻¹)	Grupo Funcional	Vibração	Referência
~3697, 3621	Argilominerais	Estiramento (-OH)	Pavia <i>et al.</i> (2010), Padilha <i>et al.</i> (2017) e Riveira <i>et al.</i> (2020)
	[Ca(OH) ₂]	Estiramento (-OH)	Piqué e Vázquez (2012)
~3439	Molécula de água	Estiramento (-OH)	Pavia <i>et al.</i> (2010), Padilha <i>et al.</i> (2017) e Riveira <i>et al.</i> (2020)
~1650	H ₂ O + Al(OH) ₃	Flexão [Al(OH) ₃]	Godoy <i>et al.</i> (2020)
~1170, 1032	Silicatos de alumínio	C-O-C, Al-O-Si e Si-O-Si	Pavia <i>et al.</i> (2010), Padilha <i>et al.</i> (2017) e Riveira <i>et al.</i> (2020)
	Fosfatos	Al-O-Si, Si-O-Si, PO ₄ ⁻	
~914, 790, 692, 540	Argilominerais e quartzo	C-H deformados, O-H deformados, Estiramento Si-O.	Pavia <i>et al.</i> (2010), Padilha <i>et al.</i> (2017) e Riveira <i>et al.</i> (2020)
	Compostos amorfos de Al	Al=O	Riveira <i>et al.</i> (2020)
~1420	Hidrocarbonetos	Dobramento C-O-H/ H-C-H	Pavia <i>et al.</i> (2010)
	Formação de C-S-H	Si-O-Si	Piqué e Vázquez (2012)

5.4.4 Caracterização de desempenho térmico

Os índices de refletância (ρ) e de absorptância (α) do corpo de prova (construído com tijolos tipo solo-cimento de traço 1:5:5 foram determinados mediante os cálculos realizados a partir das leituras de irradiação refletida, obtidas por meio do espectrômetro ALTA II. A Tabela 5.12 contém os comprimentos de onda (λ) analisados, os valores de ρ referência da folha de papel caracterizada por Dornelles e Roriz (2006) e os de ρ do corpo de prova analisado. Este apresentou refletância (ρ) de 28,5% e, conseqüentemente, absorptância (α) de 71,5%. A normativa NBR 15220-3 (ABNT, 2012) estima valores de α para tons entre amarelos e vermelho de 30-75%, de 70-80% para tijolo cerâmico vermelho e telhas de barro e de 65-80% para tijolos aparentes. Observa-se que embora o valor encontrado de absorptância para o corpo de prova de tijolos tipo solo-cimento esteja entre estes intervalos, a norma técnica brasileira não é específica para este tipo de material.

Tabela 5.12: Refletâncias de referência obtidas para uma folha de papel branco comum e para o corpo de prova em estudo

ALTA II	Comprimento de onda na faixa do visível							Comprimentos de onda na faixa do infravermelho			
	Cor	Azul	Ciano	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Vermelho*	IR1	IR2	IR3
λ (nm)	470	525	560	585	600	645	700	735	810	880	940
ρ_{ref} (%)**	87,8	84,2	80,7	79,8	79,7	87,7	95,1	96,6	96,8	97,3	95,8
ρ corpo de prova (%)	12,1	15,6	15,8	14,9	16,6	20,0	22,9	25,4	25,9	24,3	22,4

Para encontrar o valor da transmitância térmica (U), foram realizadas medições de temperaturas e fluxos de calor internos e externos, a cada 5 minutos, por 72 horas, totalizando 865 medições, por meio da caixa quente protegida.

Os dados captados durante a condução do ensaio permitiram a elaboração do gráfico apresentado na Figura 5.15. Observa-se que nas primeiras 24 horas houve um período de oscilação nas temperaturas, até que o período estacionário fosse alcançado, estabilizando, assim, as temperaturas interna e externa. Este comportamento também foi observado para a transmitância térmica.

Consideraram-se, então, para os cálculos, as médias referentes a 288 registros, equivalentes as últimas 24 horas de medição. Obteve-se a temperatura superficial média externa (T_{se}) de 44,00°C e a temperatura superficial média interna (T_{si}) de 61,02°C. O valor médio entre as diferenças de temperatura entre as faces interna e externa foi de aproximadamente 15,08°C, enquanto fluxo de calor médio que atravessou o corpo de prova foi de 68,45 Wm⁻². Por meio destes valores, calculou-se a transmitância térmica para cada intervalo de medição (U_n), podendo-se observar que os mesmos convergiram assintoticamente para o valor próximo ao real após o período de 24 horas, conforme desejado (Figura 5.15).

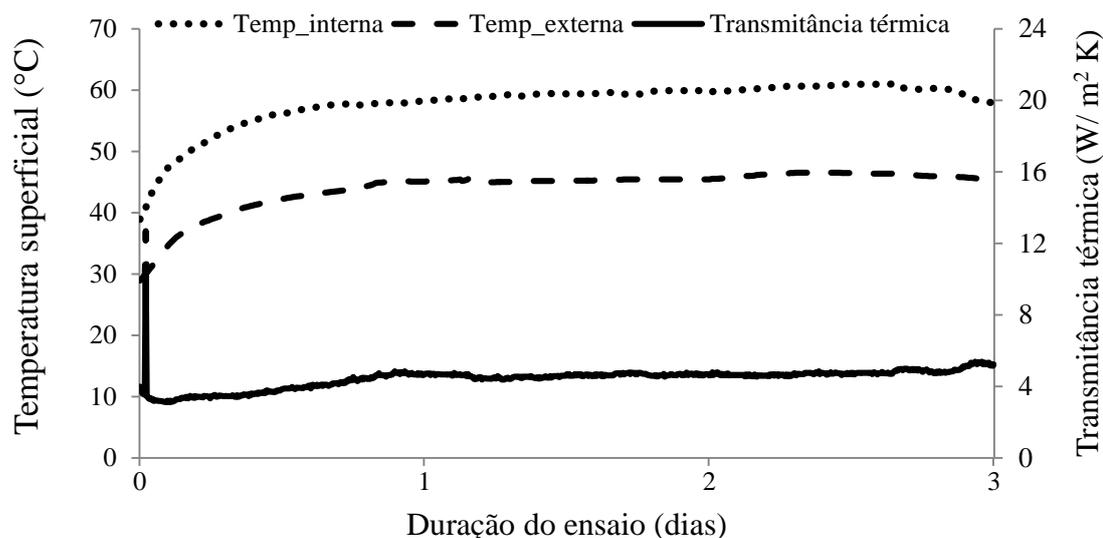


Figura 5.15: Temperatura interna e externa da parede e transmitância térmica obtidas durante o ensaio.

Assim, o método da caixa quente permitiu a obtenção do valor médio de Un e a incerteza estatística da medição de $4,00 \pm 0,06 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, o que delimita o intervalo de confiança do ensaio de $3,94 \leq Un \leq 4,06 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$; enquanto que a resistência térmica foi de $0,25 \text{m}^2\text{KW}^{-1}$ com intervalo de confiança entre $0,20 \leq R \leq 0,30 \text{m}^2\text{KW}^{-1}$.

A resistência térmica média total (R_T) de $0,41 \text{m}^2\text{KW}^{-1}$ foi calculada somando-se a média da resistência térmica com as resistências térmicas interna ($0,13 \text{m}^2\text{KW}^{-1}$) e externa ($0,04 \text{m}^2\text{KW}^{-1}$) do ar [NBR 15220-2, ABNT (2005)]. Dessa forma, a transmitância média térmica total (U) foi calculada pelo inverso da R_T (Equação 4.25), resultando em $2,44 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

A condutividade térmica (k) do corpo de prova (Equação 4.27) foi equivalente a $0,86 \text{W(m.K)}^{-1}$. Essa propriedade implicou em uma diferença de temperatura de 15°C entre as faces interna e externa do corpo de prova. Em consulta a NBR 15220-2 (ABNT, 2005), verificou-se esse parâmetro para tijolos e telhas de barro [k entre $0,70 - 1,05 \text{W(m.K)}^{-1}$], e para materiais de características argilosa e arenosa [k entre $0,52 - 0,93 \text{W(m.K)}^{-1}$], uma vez que o tijolo foi produzido com rejeito (silte-argiloso) e solo (arenoso). Da mesma forma como discutido para a absorvância, embora o valor encontrado de condutividade térmica (k) para o corpo de prova de tijolos tipo solo-cimento esteja entre estes intervalos, a norma técnica brasileira não é específica para este tipo de material.

A condutividade térmica (k) quantifica a quantidade de energia térmica que um material transmite em um intervalo de tempo. Logo, materiais com altos valores de condutividade conduzem mais calor e proporcionam menor isolamento térmico. Mansour *et al.* (2016) demonstraram que a pressão de prensagem na fabricação de tijolos tipo solo-cimento tem uma importante influência na densidade destes, que por sua vez, tem impacto direto nas suas propriedades térmicas e mecânicas. De uma forma geral, quanto maior a pressão para a fabricação dos tijolos, maiores serão a resistência à compressão (ft) e a

condutividade térmica (k) dos mesmos. Como exemplo, os autores obtiveram tijolos com densidade de 1900kgm^{-3} com resistência à compressão de $2,8\text{MPa}$ e $\hat{k} = 1,00\text{Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; já para tijolos com densidade de 1750kgm^{-3} a f_t foi de $1,0\text{MPa}$ e $\hat{k} = 0,75\text{Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (produzidos com o mesmo material). Assim, os tijolos avaliados (mistura 1:5:5), de densidade 1800kgm^{-3} (densidade calculada dividindo-se a massa dos tijolos secos pelo seu volume), têm potencial para alcançar maiores valores de densidade e resistência à compressão com o aumento da pressão de prensagem na sua fabricação. Entretanto, a sua condutividade térmica também seria maior, e, portanto, pior seria o seu desempenho térmico.

A Tabela 5.13 contém os dados obtidos de U e C_T que foram comparados aos estabelecidos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013) para as zonas climáticas brasileiras. O corpo de prova foi construído com tijolos tipo solo-cimento fabricados com rejeito de mineração e solo coletados da Z8. Observa-se que o mesmo apresenta atendimento quanto ao requisito de transmitância térmica (U) não só para a zona bioclimática 8, como para todas as demais. Já sobre a capacidade térmica (C_T), a normativa não apresenta exigências para este parâmetro na Z8, ainda que ela corresponda a quase 54% de todo o território brasileiro (Figura 3.17). Contudo, o valor encontrado de C_T ($273,43\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}$) é superior ao exigido ($130\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}$) para as zonas de 1 a 7, estando de acordo com a esta NBR. Dessa forma, seria necessária uma quantidade maior de calor para que o tijolo tipo solo-cimento altere a sua temperatura em 1°C nessas regiões.

Tabela 5.13: Parâmetros térmicos avaliados para as zonas bioclimáticas brasileiras segundo a NBR 15575-4 (ABNT, 2013)

Parâmetro avaliado	Valor obtido	Normativa 15575-4/ Zona bioclimática		
		1 e 2	(Se $\alpha \leq 0,6$) 3 - 8	(Se $\alpha > 0,6$) 3 - 8
Transmitância térmica U ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	2,47	$U \leq 2,5$	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$
Parâmetro avaliado	Valor obtido	Normativa 15575-4/ Zona bioclimática		
		1,2,3,4,5,6 e 7	Zona Bioclimática 8	
Capacidade térmica C_T ($\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	273,43	$C_T \geq 130$	sem exigência	

Já a Tabela 5.14 mostra parâmetros de desempenho térmico segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005). A transmitância térmica (U) respeita o limite estipulado para a zona bioclimática brasileira 8. O resultado obtido para U está, portanto, de acordo com as ambas as normativas. Ferreira, Souza e Assis (2017) explicam sobre a diferença entre os máximos admitidos entre elas. A NBR 15220 (ABNT, 2005) foi a primeira norma de desempenho térmico instituída no país e tem ênfase na avaliação de habitações unifamiliares com até três pavimentos. Visto a necessidade de ampliar a abrangência da primeira norma, a NBR 15575 (ABNT, 2013) compreende a avaliação do desempenho térmico de edifícios habitacionais de até cinco andares.

O valor de fator solar encontrado ($F_{so} = 6,81\%$) não atendeu o estipulado para a Z8 ($F_{so} \leq 4,0$). Entretanto, observando o cálculo desse parâmetro (Equação 4.30), nota-se que ele é diretamente proporcional a transmitância térmica (U) e a absortância (α). Dessa forma,

o simples fato de pintar o corpo de prova, que apresenta tons marrons (entre amarelo e vermelho), para uma cor clara (com $\alpha < 0,3$), ocasionaria redução no valor do F_{so} , podendo, assim, estar em conformidade com a norma técnica (DORNELLES e RORIZ, 2006).

Tabela 5.14: Parâmetros térmicos avaliados para as zonas bioclimáticas brasileiras segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2013)

Parâmetros avaliados	Valor obtido	Normativa 15220-3/ Zona Bioclimática		
		1 e 2	4, 6 e 7	3, 5 e 8
Transmitância térmica U ($Wm^{-2}K^{-1}$)	2,47	$U \leq 3,0$	$U \leq 2,2$	$U \leq 3,6$
Atraso térmico ϕ (h)	6,02	$\phi \leq 4,3$	$\phi \geq 6,5$	$\phi \leq 4,3$
Fator Solar F_{so} (%)	6,81	$F_{so} \leq 5,0$	$F_{so} \leq 3,5$	$F_{so} \leq 4,0$

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) também sugere que valores mais baixos de transmitância térmica podem ser alcançados agregando-se ao corpo de prova um revestimento argamassado na face externa, interna ou em ambas com composição de mesma condutividade térmica (a mesma mistura de rejeito e solo), visando manter, desta forma, a compatibilização entre os componentes do sistema de vedação vertical. Esta proposta, além de ocasionar um menor valor de fator solar, também gera uma maior destinação do rejeito.

Já o atraso térmico alcançado ($\phi = 6,02h$) não atendeu a normativa por ser superior ao máximo permitido ($\phi \leq 4,3$) para a Z8. Este resultado indica que seria necessário um tempo maior para que a variação de temperatura do lado externo fosse registrada no lado interno de uma edificação. A Figura 3.17 mostra que a Z8 abrange todo o estado do Amazonas, e em consulta a 15220-3 (ABNT, 2013), o atraso térmico estabelecido (ϕ) tem como referência a cidade de Manaus onde as temperaturas são elevadas, mas a amplitude térmica é baixa. Nestes casos não são indicados grandes atrasos térmicos pois isso é conseguido a partir de massa térmica (paredes grossas e com elevadas capacidades térmicas).

Dessa forma, alguns autores discutem os limites desta propriedade segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. Como exemplo, o trabalho de Matos (2007) ressalta que os valores estabelecidos para atraso térmico pela 15220-3 (ABNT, 2013), para habitações na zona bioclimática 3 não se justificam, uma vez que valores maiores de ϕ resultaram em um melhor desempenho térmico. De modo semelhante, Oliveira (2012) demonstrou que maiores valores de ϕ foram responsáveis por um maior conforto térmico em habitações na Z2. Ferreira, Souza e Assis (2017) concluíram que para a zona bioclimática 8, em localidades em que há o predomínio do clima quente e seco, existe a necessidade de que as paredes possuam atraso térmico superior ao sugerido pela norma ($\phi \leq 4,3h$). Lima *et al.* (2018) ao discutir os aspectos climatológicos do município de Peixoto de Azevedo, cidade onde foram coletados o rejeito de mineração e o solo, discorrem sobre as temperaturas elevadas, média amplitude térmica diária, e longos períodos de baixa umidade do ar.

Portanto, em adesão aos trabalhos de Matos (2007), Oliveira (2012) e Ferreira, Souza e Assis (2017), acredita-se que existem incongruências entre os valores limite de atraso térmico para as zonas bioclimáticas brasileiras, bem como a necessidade de se avaliar o parâmetro capacidade térmica para a zona 8.

Para que o atraso térmico esteja em conformidade com as outras zonas bioclimáticas em que $\varphi \geq 6,5$, faz-se necessário aumentar a resistência térmica do corpo de prova (Equação 4.29). A elevação da resistência térmica pode ser alcançada a partir da agregação de uma camada de revestimento argamassa conforme recomendação da NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Mansour *et al.* (2016) demonstraram que a pressão de prensagem do tijolo de solo-cimento tem uma influência direta na sua densidade, o que impacta no seu comportamento mecânico e térmico. De uma forma geral, quanto maior a pressão de prensagem, maior será a resistência à compressão do tijolo, entretanto, menor será a sua resistência térmica. Isso se deve ao fato de uma maior prensagem promover um maior empacotamento dos grãos presentes na mistura, o que diminui a porosidade da mesma. Os poros, por sua vez, reduzem a propagação de calor de uma superfície para outra, elevando a resistência térmica do material. Como a resistência à compressão é um dos parâmetros mais importantes para classificar um tijolo como tipo solo-cimento, seria mais interessante aumentar a espessura dos blocos, visto que Fayçal *et al.* (2016), demonstraram que a resistência térmica aumenta linearmente com a espessura e dos tijolos. Assim, conforme pode ser observado na Equação 4.28, uma maior e implica em uma maior C_T , que, por sua vez, aumenta o valor do atraso térmico φ . Ou seja, quanto maior a espessura do tijolo, ou mais grossa a parede construída por eles, melhor o desempenho térmico do sistema de vedação.

Ainda que os resultados tenham sido discutidos principalmente em torno da Zona bioclimática 8, o estado de Mato Grosso também é composto pelas zonas 5, 6 e 7 (Figura 3.17). Visto que a atividade mineradora é forte em vários municípios da região, e que a geração de rejeitos seja uma preocupação em muitas delas; também foram discutidas formas de adequar os parâmetros de desempenho térmico em todas elas tais como o aumento da espessura dos tijolos, o seu revestimento, tinturas que aumentem a refletância dos mesmos e aumento da espessura dos tijolos.

5.5 Análise de custos dos tijolos

Uma breve análise financeira foi realizada afim de avaliar a viabilidade da produção dos tijolos tipo solo-cimento de traço 1:5:5. O Quadro 5.2 ilustra o levantamento de gastos realizado para que a mineração em pequena escala em questão possa incluir a fabricação destes tijolos como forma de aproveitar o rejeito gerado. O levantamento realizado inclui o custo de equipamentos para início da fabricação de tijolos, de mão de obra, das matérias-primas, de análises para certificação de tijolos e lucro por venda. Para estimar o valor da aquisição de equipamentos e insumos, fez-se uma média aritmética de 3 orçamentos, buscando fornecedores locais, ou, o mais próximo possível (considerando o município de Peixoto de Azevedo).

Para obter os custos de aquisição de equipamentos, foi considerada a compra de uma escavadeira (capacidade de até 5m³ por caçamba) e um caminhão (capacidade de 15m³)

para operação de amostragem. Ainda que a empresa já possua equipamentos com essas especificações, eles são utilizados na lavra, e não seria interessante comprometer as etapas de carregamento e transporte. Também foi orçado o preço de se montar um laboratório pequeno para os ensaios físicos, geotécnicos e de estudos de dosagens, já discutidos, com os aparatos necessários para a realização dos testes, contando a estrutura física e instalação elétrica dentro da área da mineradora. Também foram incluídos os preços de duas betoneiras e duas máquinas manuais de prensagem dos tijolos (a mesma utilizada nessa pesquisa).

Ao estimar o custo de mão de obra, adotou-se o cálculo publicado pela Fundação Getúlio Vargas, FGV (2012) onde considera-se, além do salário, os gastos referentes a alimentação, transporte, encargos sociais, décimo terceiro salário, férias, e outros relacionados a possíveis afastamentos (licença maternidade/paternidade, para tratamento médicos, entre outros). Foram denominados 9 cargos (2 para amostragem, 1 para testes de laboratórios, 4 para fabricação de tijolos, 1 para serviços gerais e 1 para recepção), tendo como base a remuneração média para operadores do empreendimento, de R\$2000,00. O cálculo sugerido pela fundação mostra que o custo mensal para a empresa por funcionário tendo como base o referido salário é de R\$4205,00.

Quadro 5.2: Levantamento de custos para a fabricação de tijolos tipo solo-cimento

Avaliação de Mão de Obra (R\$)		
Custo Mensal por Funcionário		-4.205,00
Total Anual por Funcionário		-50.460,00
Número de Funcionários		9
Total Anual		-454.140,00
Análise de Matérias Primas (R\$)		
Cimento por unidade de tijolo		-0,01
Água por unidade de tijolo		0
Rejeito por unidade de tijolo		0
Solo por unidade de tijolo		-0,1
Total para produção de 1 tijolo		-0,11
Análise de Produção de tijolos (unidade)		
Produção dos tijolos	Mensal	Anual
Produção ano 0	0	0
Produção ano 1	30.000	360.000
Produção ano 2	30.000	360.000
Produção ano 3	30.000	360.000
Produção ano 4	30.000	360.000
Produção ano 5	30.000	360.000
Análise de Vendas (R\$)		
Proporção Milheiro / Individual	Ano 0	Demais
Preço Unitário por Milheiro R\$1,35	0	437.400,00
Preço Unitário Isolado R\$1,45	0	52.200,00

Adentrando os custos das matérias-primas, o rejeito é um passivo ambiental, resultante do beneficiamento mineral, e, por isso, não tem custo associado. De modo semelhante, os custos para obtenção de água já estão inclusos nesta etapa. Estimou-se o valor gasto em cimento por tijolo produzido (traço 1:5:5) e verificou-se que o solo utilizado pode ser o movimentado na própria mineradora (material estéril, retirado para construção de lagoas de decantação, construção de galpões, acessos e pistas de manobra). Assim, o custo associado refere-se ao transporte desse solo até o laboratório onde serão fabricados os tijolos.

Após amostrada, cada pilha de rejeitos deve passar por análise ambiental segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) e também por técnica de detecção de ouro Fire Assay (já discutido), para que não sejam produzidos tijolos que apresentem periculosidade humana ou para o habitat, e tampouco contenham o metal com autovalor associado. O levantamento realizado inclui o frete do material para a SGS Geosol em Minas Gerais (tais análises não são realizadas na região centro-oeste do país).

Verificou-se o preço de venda por unidade e por milheiro de tijolos tipo solo-cimento. Não foi encontrada empresa desse ramo em Peixoto de Azevedo, por isso os orçamentos realizados têm como base a capital Cuiabá.

Uma vez levantados os custos de investimentos, a Tabela 5.15 traz o fluxo de caixa realizado, em função do tempo, que contém os investimentos necessários para a implementação da fábrica de tijolos, os custos com mão de obra, com as matérias-primas, com as certificações dos tijolos, a receita obtida pela venda, a massa de rejeito utilizada para o traço avaliado, e os cálculos de Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

Através da Tabela 5.15, observa-se que o valor da Taxa Interna de Retorno (TIR) foi de 22,4%, e a de Taxa Mínima de Atratividade (TMA) foi de 10%. Segundo a metodologia clássica de análise de investimentos em ativos reais defendida por Souza e Clemente (2012), quando $TIR > TMA$, o investimento realizado em um empreendimento é lucrativo.

Os cálculos feitos permitiram a construção gráfica do fluxo de caixa acumulado – Figura 5.16 que contém o *payback* (2 anos e 3 meses) referente ao investimento realizado para a produção de tijolos de solo-cimento. Observa-se que, para as condições estabelecidas, a produção de tijolos tipo solo-cimento só passa a ser lucrativa após esse período de 2 anos e 3 meses. Nos anteriores, o valor obtido pela venda custeia o investimento inicial feito. O cálculo foi realizado para a venda do milheiro. Ainda que seja mais vantajosa a venda da unidade, é comum a compra de grandes quantidades. As máquinas de prensagem consideradas (com eficiência de 70%) foram as mesmas utilizadas para o presente estudo; outras máquinas de prensagem, como as hidráulicas ou, até mesmo, mais unidades da Permaq MTS-010, garantem uma maior produção diária, que seria responsável por uma recuperação mais rápida do montante investido. Um levantamento de custos mais detalhado incluiria os gastos com conta de energia, aumento do preço do combustível utilizado nas etapas de carregamento e transporte, manutenção e reposição de aparatos avariados, formalização do Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica, CNPJ, marketing e possíveis rescisões de contratos. Ainda assim, estima-se, através de cálculos realizados que o lucro pela fabricação dos tijolos ultrapasse R\$500.000,00 no quinto ano.

Tabela 5.15: Fluxo de caixa para a produção de tijolos tipo solo-cimento

Fluxo de caixa/Ano	0	1	2	3	4	5
1. Investimentos (R\$)	-376.400	0	0	0	0	0
1.1 Escavadeira e Caminhão	-150.000	0	0	0	0	0
1.2 Montagem de Laboratório	-200.000	0	0	0	0	0
1.3 Prensa Manual Permaq MTS-010 (2 unidades)	-23.600	0	0	0	0	0
1.4 Betoneira 120L (2 unidades)	-2.800	0	0	0	0	0
2. Mão de Obra (R\$)	0	-454.140	-454.140	-454.140	-454.140	-454.140
2.1 Total anual para 9 funcionários	0	-454.140	-454.140	-454.140	-454.140	-454.140
3. Custos com Matérias Primas (R\$)	0	-39.600	-39.600	-39.600	-39.600	-39.600
3.1 Cimento	0	-3.600	-3.600	-3.600	-3.600	-3.600
3.2 Água (inclusa nos custos da operação minerária)	0	0	0	0	0	0
3.3 Rejeito (passivo ambiental disponível)	0	0	0	0	0	0
3.4 Solo (custo de transporte)	0	-36.000	-36.000	-36.000	-36.000	-36.000
4. Custos de Análise para Certificação -com frete- (R\$)	0	-4.000	-4.000	-4.000	-4.000	-4.000
Laudo de Classificação de resíduo sólido (1 pilha de rejeito anual)	0	-3.000	-3.000	-3.000	-3.000	-3.000
Análise para detecção de Au <i>Fire Assay</i> (1 pilha de rejeito anual)	0	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
5. Receitas (R\$)	0	666.180	666.180	666.180	666.180	666.180
5.1 Venda de Milheiros	0	590.490	590.490	590.490	590.490	590.490
5.2 Venda de Tijolos Individuais	0	75.690	75.690	75.690	75.690	75.690
6. Total Geral (R\$)	-376.400	168.440	168.440	168.440	168.440	168.440
7. Massa de rejeito utilizada (kg)	0	300.000,00	600.000,00	900.000,00	1.200.000,00	1.500.000,00
Calculo VPL (R\$)	-376.400,00	153.079,96	139.120,60	126.434,19	114.904,66	104.426,50
t (ano)	0	1	2	3	4	5
TMA (%)						10,0%
VPL (R\$)						261.565,90
TIR (%)						22,4%

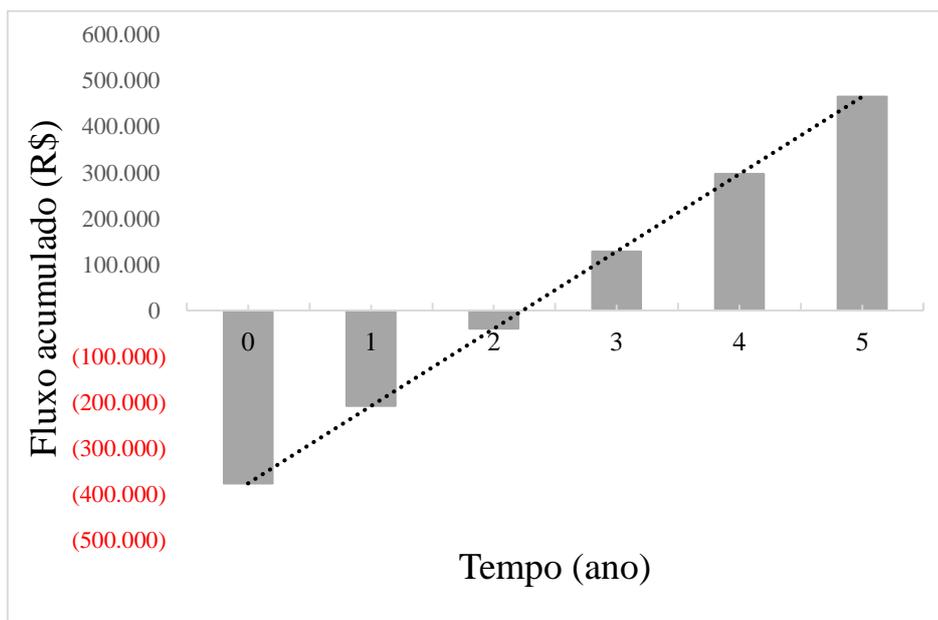
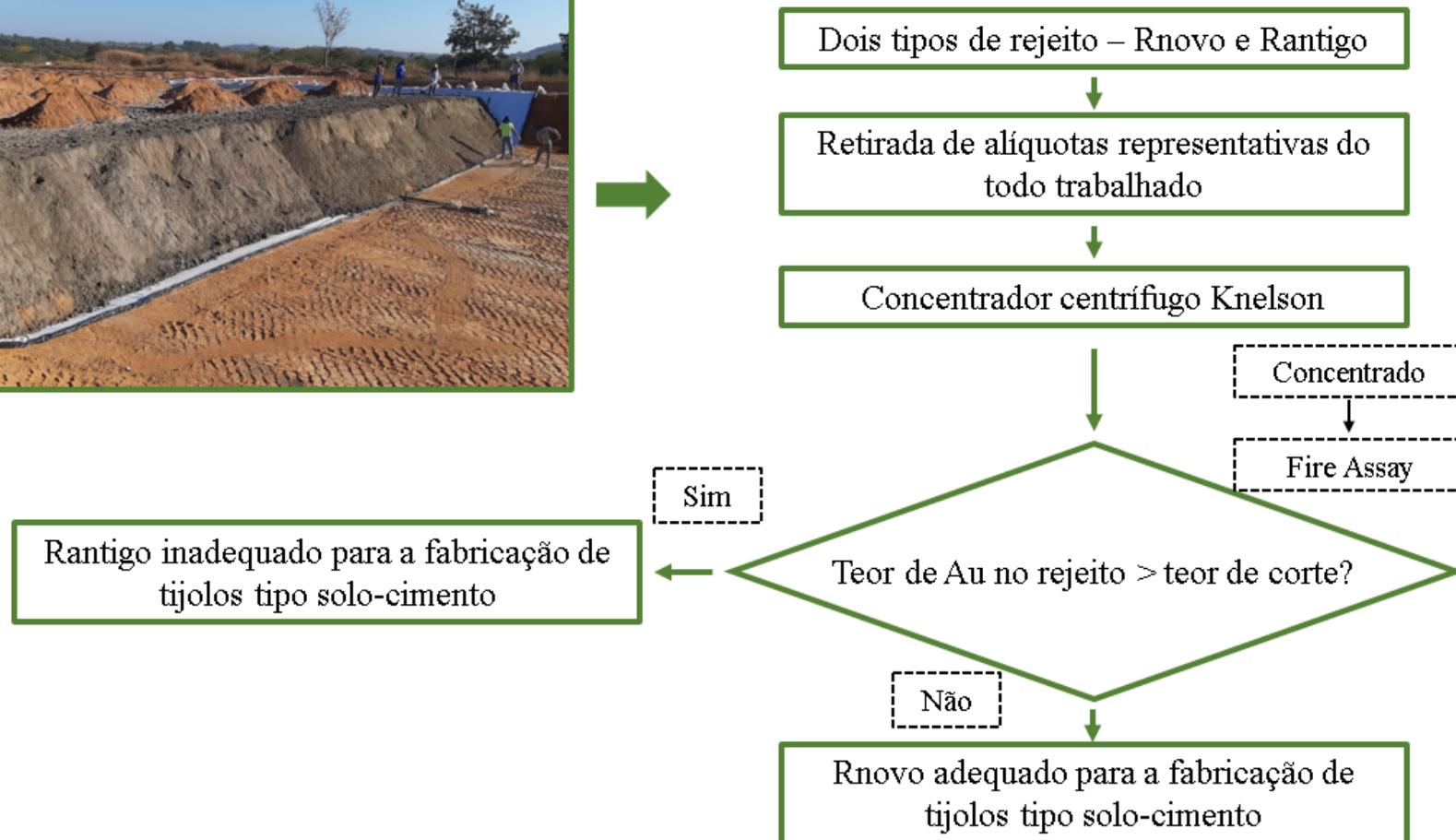


Figura 5.16: Fluxo de caixa acumulado da produção de tijolos de solo-cimento.

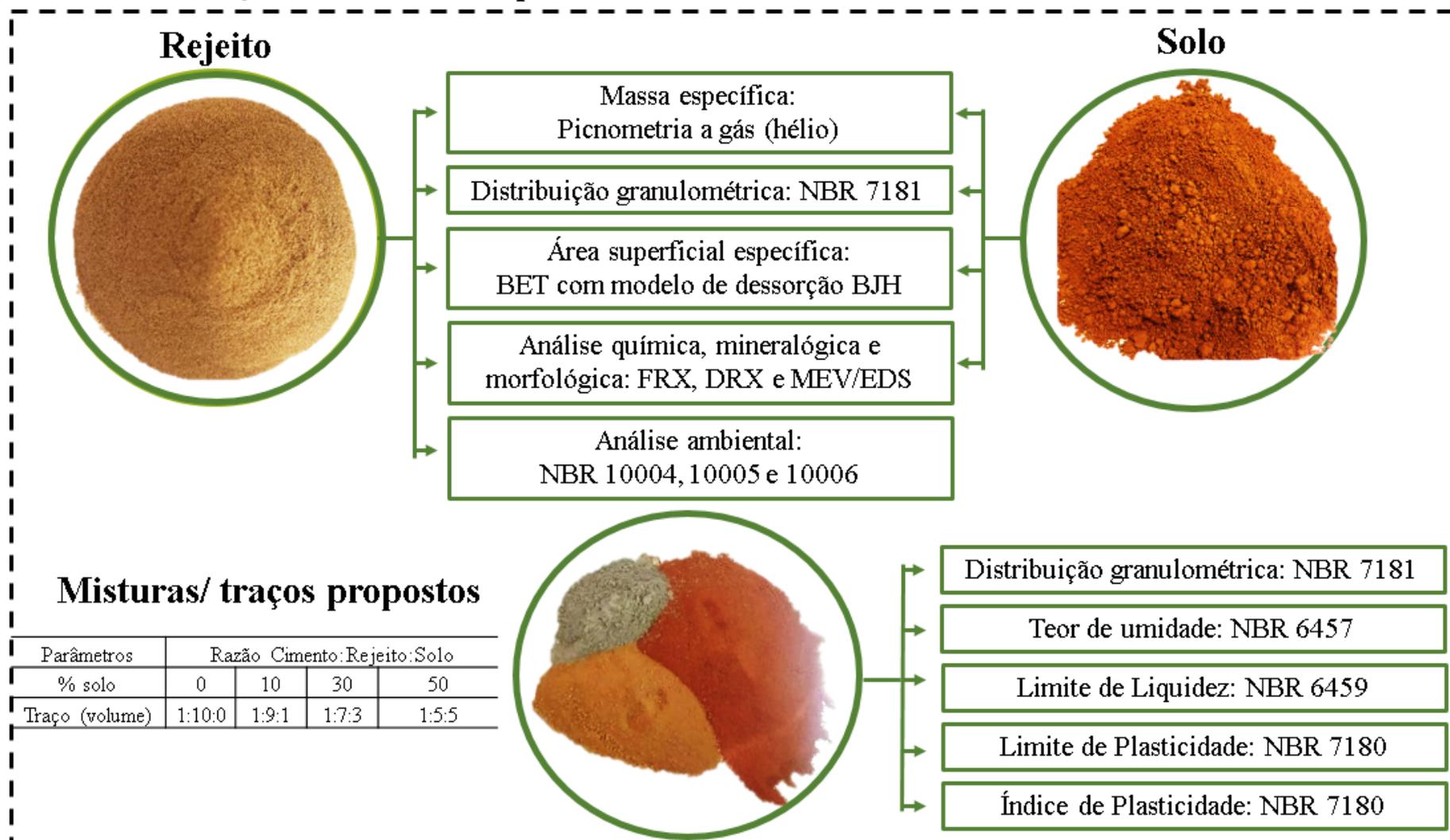
Ainda que o lucro previsto pela produção de tijolos tipo solo-cimento seja irrisório se comparado a atividade principal do empreendimento (mineração de ouro), este novo ramo segue os preceitos da economia circular defendida por Tayebi-Khorami et al. (2019). Segundo os autores, a atividade mineradora sustentável deve buscar formas interdisciplinares e inovadoras de gerar valor para o seu rejeito, de forma que o impacto ambiental associado seja o menor possível. Dessa forma, a prática proposta de fabricação de tijolos tipo solo-cimento, ademais de utilizar rejeito de mineração como matéria-prima, também movimentava a economia local na implementação do projeto, durante a sua vida útil através da compra de cimento, gera empregos diretos e indiretos (frete para entrega de tijolos), e compactua com o ideal de mineração responsável.

Por fim, a Figura 5.17 ilustra a sequência realizada desde a amostragem do rejeito escolhido até a caracterização dos tijolos produzidos.

1 - Definição do local e operações de amostragem



2- Caracterização das matérias-primas



3 – Estudos de dosagens para a fabricação dos tijolos tipo solo-cimento



Determinação de massa específica máxima e teor de umidade ótimo para a fabricação de tijolos para cada mistura proposta



4- Caracterização dos tijolos tipo solo-cimento

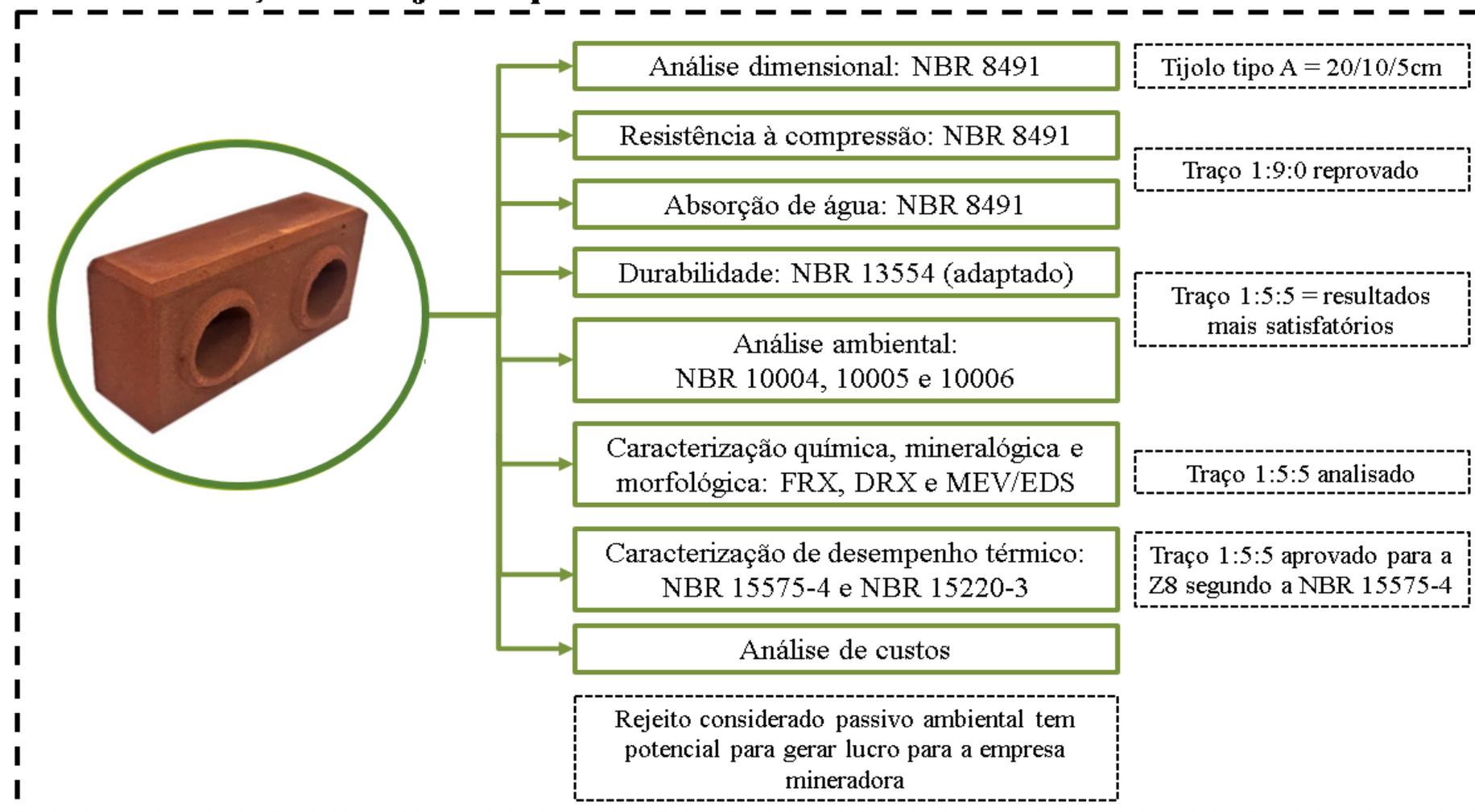


Figura 5.17: Fluxograma da metodologia adotada e dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Conclui-se que o rejeito de mineração em pequena escala de ouro estudado, ainda que silte - argiloso, pode ser utilizado na fabricação de tijolo tipo solo-cimento desde que caracterizado e adequado às normas vigentes do país.

No Brasil, a NBR 8491 (ABNT, 2012) especifica para tijolos de solo-cimento o valor mínimo de resistência à compressão (f_t) de 2,0 MPa e máximo de absorção de água (A) de 20%. Dentre as misturas avaliadas para os tijolos fabricados, a 1:10:0 (cimento:rejeito:solo) não alcançou os valores estabelecidos pela norma. Já as demais composições, 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 atingiram valores de f_t de 2,0, 2,6 e 3,1 MPa nessa ordem, e valores de A de 19,8, 18,38 e 17,04%, respectivamente. Devido ao fato do solo possuir predominantemente uma fração mais grossa (90%), quanto maior a quantidade deste material adicionado, maiores serão os valores de f_t e menores os valores de A dos tijolos produzidos, tendo em vista uma maior tendência de redução do seu índice de vazios. De modo análogo, quanto maior a fração solo, melhor a durabilidade do tijolo. Todas as misturas propostas estão em conformidade com a NBR 13554 (ABNT, 2012) que prevê uma perda de massa máxima de 7%.

Ainda que as misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 estejam em conformidade com a NBR 8491 (ABNT, 2012), o presente trabalho ressalta a importância da avaliação ambiental em tijolos produzidos com rejeitos de mineração. Cada rejeito possui características intrínsecas à sua formação geológica e ao processamento mineral prévio. Enquanto o rejeito possuía concentração de cianeto acima do normatizado, todas as misturas propostas estiveram abaixo desse limite.

A avaliação química e morfológica confirmou a existência de fases C-S-H e C-A-S-H (produtos de hidratação do cimento) no tijolo de mistura 1:5:5. Quanto maior a adição de solo, mais as concentrações de Al, Cr, e fluoretos se aproximaram do especificado. Mesmo com a imobilização de cianeto, o tijolo foi classificado como não perigoso, contudo, não inerte, devido a solubilização de Al acima do normatizado pela NBR 10006 (ABNT, 2004). Acredita-se que o tijolo possa ser aproveitado pela indústria civil pois o alumínio é um elemento comum em argilominerais. Em adição, a NBR 10004 (ABNT, 2004) trata da classificação de resíduos sólidos para a sua disposição, e não para o seu aproveitamento em outros setores.

Sobre a caracterização de desempenho térmico dos tijolos de traço 1:5:5 para a Z8, a absorvância (α) foi de 71%. Para menores valores deste parâmetro, cor do tijolo pode ser alterada para tons mais claros, elevando sua refletância (ρ), diminuindo o seu α , trazendo assim, o seu fator solar (F_{so}) para dentro dos limites normativos.

O valor encontrado de transmitância térmica (U) está em conformidade com os estimados pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e pela NBR 15220 (ABNT, 2005). Segundo esta última, o fator solar encontrado ($F_{so} = 6,81$) está em desacordo com o máximo preconizado ($F_{so} \leq 4,0$). Para a adequação desse parâmetro, além da pintura dos tijolos com cores de baixa absorvância solar (α), outra alternativa seria diminuir o valor da transmitância térmica U através do revestimento externo argamassado dos tijolos.

Também segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005) o valor do atraso térmico encontrado ($\varphi \leq 6,02$) foi reprovado por ser superior ao máximo admitido ($\varphi \leq 4,3$). Entretanto, a revisão bibliográfica mostrou que este parâmetro precisa ser revisado para a Z8. Em adição, a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) não tem exigências de capacidade térmica (C_T) para esta zona bioclimática, ainda que ela represente mais de 50% do território brasileiro.

A análise de custos demonstrou que o rejeito, material que constitui um passivo ambiental, pode gerar lucro a partir do terceiro ano de funcionamento da unidade de fabricação de tijolos de solo-cimento que poderá ser implementada. Em adição, a nova prática irá gerar seis empregos diretos e contribuir para a movimentação da economia local, indo então, ao encontro dos preceitos da economia circular.

A revisão bibliográfica mostrou que ainda que sejam crescentes o número de estudos que busquem aproveitar rejeitos de mineração, estes estão voltados, em sua maioria, para a mineração de ferro (rejeito não perigoso e inerte) de característica arenosa, e concentrados nas regiões sul e sudeste. A mineração do estado de Mato Grosso é direcionada para o beneficiamento de ouro cujo descarte é silte-argiloso, e pode conter substâncias perigosas e não inertes, tais como mercúrio, arsênio e cianeto. Para que estes rejeitos sejam aproveitados, em qualquer ramo industrial, indica-se que a sua amostragem seja feita de maneira cautelosa, uma vez que estes possam conter o metal nobre (de alto valor associado) e que possam apresentar o efeito pepita.

Por fim, o uso de rejeito de mineração no ramo civil vai ao encontro do que preconiza a economia circular, pois aumenta a vida útil de um material que até então era considerado um passivo ambiental.

CAPÍTULO 7: CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

Este estudo técnico abre espaço para um campo ainda pouco explorado que é o aproveitamento de rejeito de mineração de ouro. A abordagem tomada para a valorização do rejeito levou em consideração a resolução de um problema atual, com os recursos reais do empreendimento em questão: matérias-primas locais, cimento facilmente encontrado, baixo investimento inicial, fácil operação da máquina de tijolos, geração de emprego e movimentação do comércio local, assim como previsto pela economia circular na mineração. Como contribuições científicas originais ao conhecimento, este trabalho apresenta:

- A caracterização de rejeito de mineração em pequena escala em Mato Grosso: A revisão bibliográfica realizada indicou que trabalhos que investigam o uso de resíduos industriais na fabricação de tijolos solo-cimento são crescentes e atuais, entretanto, quando envolvem rejeito de mineração, estes são inertes e de granulometria arenosa, tais como rejeito de mineração de agregados ou ferro; e, quando no Brasil, estão concentrados nas regiões Sul e Sudeste. Trabalhos que tratem a caracterização de rejeitos de mineração na região centro-oeste do país, são basicamente, inexistentes;
- A caracterização ambiental de tijolos de solo-cimento fabricados com rejeito de mineração de ouro: Alguns trabalhos internacionais abordam o aproveitamento de rejeitos de mineração de ouro (que geralmente são silte-argiloso e contém substâncias nocivas tais como o mercúrio e o cianeto) na fabricação de tijolos ecológicos, entretanto, os próprios autores [Roy, Adhikari e Gupta (2007) e Malatse e Ndlovu (2015)] indicam a necessidade da caracterização ambiental para afirmar o uso potencial desse material como insumo para a indústria civil;
- Indica o uso potencial do aproveitamento de rejeito de garimpo de ouro na produção de tijolos de solo-cimento segundo as orientações da NBR 8491 (ABNT, 2012): Pesquisas e relatórios que abordam a mineração em pequena escala no país [Veiga e Baker (2004), Teschner *et al.* (2017), Massaro e Theije (2018), MME (2018), ANM (2019), ANM (2020)] quase sempre, tratam de temas sociais e ou/ mapeiam essas atividades, não discutem o beneficiamento adotado por essas instituições, tampouco a quantidade e formas de se minimizar o impacto gerado pelo rejeito produzido;
- Aponta a formação de fases de hidratação do cimento C-S-H e C-A-S-H responsáveis pela estabilização do cianeto em tijolos de solo-cimento produzidos com rejeito de mineração de ouro;
- Indica a necessidade de normatização quanto aos parâmetros absorvância (α) e transmitância térmica (U) para tijolos de solo-cimento: As normativas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013) tratam do desempenho térmico em edificações, entretanto, não são específicas para este material.

CAPÍTULO 8: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo como base os resultados obtidos por essa tese de doutorado e com o objetivo de aproveitar rejeito de mineração em pequena escala de ouro na fabricação de tijolos de solo-cimento, são propostos os tópicos abaixo para trabalhos futuros:

- Avaliar tijolos com maiores proporções do cimento C_{PII}-Z-32, afim de verificar se uma maior proporção de fases de hidratação do cimento, C-S-H e C-A-S-H, restringem a solubilização de alumínio;
- Realizar estudo energético para avaliar o CO₂ gasto na produção do tijolo solo cimento e comparar os resultados obtidos com os dos tijolos tradicionais.
- Utilizar a técnica de caracterização Mineral Liberation Analysis para detecção de ouro no rejeito proveniente do antigo processo hidrometalúrgico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM, Brasília: Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas, 2019 - CDD 338.2098161 *versão online*. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/AMB2019_anobase2018_FINAL.pdf>. Acesso em janeiro de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM, Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração, 2020 - ISBN 978-85-62967-05-4, *versão online*. Disponível em: <<https://www.govbr/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-1/relatorio-anual-gsbm-2019-v-final>>. Acesso em janeiro de 2021.

ALIBABA, 2020. Disponível em: <<https://www.alibaba.com/showroom/ceb-machine.html>>. Acesso em janeiro de 2021.

ARCHDAILY, 2020. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/894341/rammed-earth-construction-15-exemplary-projects>>. Acesso em outubro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, ABCP, São Paulo. *BT-106*: Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. ed., São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, ABCP, São Paulo. *BT-111*: Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. 3. ed., São Paulo, 2000. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, Rio de Janeiro. *NBR 10004*: Resíduos sólidos. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

_____*NBR 10005*: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduo sólido. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 16p.

_____*NBR 10006*: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduo sólido. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 3p.

_____*NBR 10007*: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 25p.

_____*NBR 10833*: Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____*NBR 10834*: 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, 2012. 5p.

_____*NBR 10836*: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013. 4p.

_____*NBR 12023*: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012. 7p.

_____*NBR 12024*: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012. 6p.

_____*NBR 12025*: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 2p.

_____*NBR 12770*: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada

- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 4p.
- _____*NBR 13554*: Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 4p.
- _____*NBR 15220*: Desempenho térmico das edificações. Rio de Janeiro, 2005. 88p.
- _____*NBR 15575*: Edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013. 71p.
- _____*NBR 15900*: Água para amassamento de concreto. Rio de Janeiro, 2009. 11p.
- _____*NBR 16697*: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12p.
- _____*NBR 6457*: Amostras de solo- Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.
- _____*NBR 6459*: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.
- _____*NBR 6502*: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- _____*NBR 7180*: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.
- _____*NBR 7181*: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018. 12p.
- _____*NBR 8491*: Tijolo de de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5p.
- _____*NBR 8492*: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 4p.
- _____*NBR ISO: 7500-1*: Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial. Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração e verificação do sistema de medição da força, 2016. 19p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO TIJOLO, ANITECO, 2020. Disponível em: <<https://www.aniteco.org.br/>>. Acesso em janeiro de 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM, West Conshohocken. *G173*: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, West Conshohocken, 2012.

BAKER, P. *U-values and traditional buildings. In situ measurements and their comparisons to calculated values*. Scotland: Glasgow Caledonian University, 2011.70p. (Technical Paper 10). Disponível em: < <https://docplayer.net/329714-Technical-paper-10-u-values-and-traditional-buildings.html>>. Acesso em julho de 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controlinflacao/taxaselic>>. Acesso em março de 2021.

BARRETO, M. L. *Mineração e Desenvolvimento Sustentável - desafios para o Brasil*. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 215p.

BARRETO, S. S. *Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico*. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, 2020. 112p. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia dos Materiais).

BARROS, M. M.; OLIVEIRA, M. F. L.; RIBEIRO, R. C. C. R.; BASTOS, D. C.; OLIVEIRA, M. G. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. *Construction and Building Materials*, v. 232, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117252>.

BESTRATEN, S.; HORMÍAS, E.; ALTEMIR, A. Construcción con tierra en el siglo XX. *Informes de la Construcción*, v. 63, n. 523, p. 5-20, sep. 2011.

BEZERRA, A. C. S.; FRANÇA, S.; MAGALHÃES, L. F.; CARVALHO, M. C. R., Ativação alcalina de cinzas com alto teor de cálcio e rejeitos de minério de ferro e seu potencial de reciclagem em materiais de construção, *Ambiente Construído*, v. 19, n. 3, p. 99- 12, jun. 2019. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300327>.

BITENCOURT, E. R. *Utilização de matéria-prima alternativa na fabricação de tijolos de argila vermelha e branca*. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004. 60p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. *Rock Mechanics: For underground mining*. 3.ed. London: Springer, 2013. 570p.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: *Diário Oficial da União*, Brasília, 05 jul. 2002.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Portaria nº 155, de 12 de maio de 2016. Aprova a Consolidação Normativa do DNPM e revoga os atos normativos consolidados. *Diário Oficial da União*, 12 mai. 2016.

BRAZ, I. G.; SHINZATO, M. C.; MONTANHEIRO, T. J.; ALMEIDA, T. M.; CARVALHO, F. M. S. Effect of the Addition of Aluminum Recycling Waste on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash and Zeolite. *Waste and Biomass Valorization*, n. 10, p. 3493 – 3513, nov. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0342-6>.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. *Ambiente Construído*, v. 13, n. 2, p. 15-27, mar. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200003>.

CAGNON, F.A.; FRANCISCO, A.D.; VIANA, E.; FONSECA, F.H. A inadequabilidade técnica da aplicação da NBR 10.004 para a caracterização e classificação de solos escavados com potencial de contaminação. *Multitemas*, v. 23, n. 53, p. 71-90, jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.20435/multi.v23i53.1586>

CAUDURO, F. *Avaliação experimental de procedimentos de lixiviação de resíduos*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 97p. (Mestrado, Dissertação em Engenharia Ambiental).

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; OLIVEIRA, A. S. Thermal resistance and conductivity of recycled construction and demolition waste (RCDW) concrete blocks. *REM – International Engineering Journal*, v. 70, n. 2, p. 167-173, jun. 2017. <https://doi.org/10.1590/0370-44672015700048>.

CAPITAL, 2021. Disponível em: <<https://www.capitalresearch.com.br/blog/investimentos/commodities-brasil/>>. Acesso em janeiro de 2021.

CAVALCANTI FILHO, L. L. *Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba*. Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2016. 96p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental).

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, CB3E. *Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. 23p. (Boletim técnico). Disponível em: <http://www.cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Guia_medicao_refletancia_CB3E_v1.pdf>. Acesso em julho de 2020.

CHAVES, A.P.; FERREIRA, F.M. Estocagem em pilhas. In: CHAVES, A. P. *Manuseio de sólidos granulados*. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. capítulo 1, p. 18-93.

CHUMBINHO, J. M. *Otimização de solos para a produção de blocos de terra compactada*. Évora: Universidade de Évora, 2017. 178p. (Dissertação, Mestrado em Geociências).

CIMINELLI, V.S.T.; GOMES, A. D. Princípios da cianetação. In: TRINDADE, R. B. E.; BARBOSA FILHO, O. *Extração de ouro: Princípios, tecnologia e meio ambiente*. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2002. cap 2, p. 23-58.

CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA, CADE, Mercado de cimento no Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.cade.gov.br/aceso-a-informacao/publicacoes-institucionais/publicacoes-dee/CadernodoCadeMercadodeCimento.pdf>> Acesso em agosto de 2019.

CONSTRUROHR, 2020. Disponível em: <<http://www.desempenho.construrohr.com.br/norma/detalhamento>>. Acesso em janeiro de 2021.

COOGAVEP, 2018. Disponível em: <<http://www.coogavepe.org/>> Acesso em outubro de 2018.

CORBY, A. *Fundamentals of Fire Assay*. United States: Colorado School of Mines, 2020. 37p. *versão online*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/345311440_Fundamentals_of_Fire_Assay>. Acesso em maio de 2020.

CORDEIRO, C. C. M. *Caracterização de um solo tropical visando sua utilização como material para pequenas construções em terra compactada*. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2019. 157p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental).

CORDEIRO, C. C. M.; BRANDÃO, D. Q.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Thermophysical characterization of lateritic soil for manufacturing rammed earth walls. *Matéria*, v. 25, n. 1, apr. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0889>.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. *Elements of X-ray diffraction*, 3 ed. Pearson, 2001. 696p.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, DNPM, *Cooperativismo Mineral no Brasil; O caminho das pedras, passo a passo*. 1. ed. Brasília: DNPM, 2008. 134p.

DOMINGUES, R. M. V. *Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC*. Braga: Universidade do Minho, 2015. 136p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Thermal inertia, comfort and energy consumption in buildings: a case study in Sao Paulo state - Brazil. *International Journal for Housing and its Applications*, v.28, n.2, p.153-162, 2004.

DUARTE, A. P. *Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 114p. (Dissertação, Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos).

DUVAL, C. *Inorganic thermogravimetric analysis*. 2.ed. Nova York: Elsevier, 1963. 700p.

EDRAKI, M.; BAUMGARTL, T.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D.; FRANKS, D. M.; MORAN, C. J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, v. 84, p. 411-420, dec. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>.

EIJK, D. V.; SOUZA, V. C. M. Surgimento, desenvolvimento e desaparecimento da técnica taipa de pilão no Brasil. *Conservar Património*, n. 3-4, p. 17-24, 2006.

FAYÇAL, E. F.; LAFHAJ, Z.; ANTCZAK, E.; CHAPISEAU, C. Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks. *Applied Thermal Engineering*, v.93, p. 377-383, jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.009>.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A.; ASSIS, E. S. Discussion of the limits of the thermal properties of building envelopes according to Brazilian thermal performance standards. *Ambiente Construído*. v.17, n.1, p. 183 - 200, mar. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100131>

FERREIRA, J. C. V. *Mato Grosso e Seus Municípios*. 1. ed. Cuiabá: Secretaria de Estado de Educação, Editora Buriti, 2001. 660p.

FONSÊCA, N. J. M. *Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico*. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018. 87p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

FRANKE, L. N. *Arquitetura Contemporânea em Terra: modos de ver e fazer*. Porto: Universidade do Porto, 2017. 237p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS, FGV. Rio de Janeiro: Custo do trabalho no Brasil - Proposta de uma nova metodologia de mensuração, 2012. Disponível em:

<[https://cmicro.fgv.br/sites/cmicro.fgv.br/files/file/Custo%20do%20Trabalho%20no%20Brasil%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final\(1\).pdf](https://cmicro.fgv.br/sites/cmicro.fgv.br/files/file/Custo%20do%20Trabalho%20no%20Brasil%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final(1).pdf)>. Acesso em janeiro de 2021.

GOLDPRICE, 2020. Disponível em: <<https://goldprice.org/pt/gold-price-chart.html>>. Acesso em dezembro de 2020.

GOMES, A. C. F. *Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração*. Belo Horizonte:Universdade Federal de Minas Gerais, 2017. 84p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas).

GONÇALVES, T. D.; GOMES, M. I. Construção de terra: potencialidades e questões em aberto. *Jornadas LNEC*, Lisboa, v. 18, 2012.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. R.; JUÁREZ-ALVARADO, C. A.; FRANCIS, B. A.; RANGEL, J. M. M. Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, v. 163, p. 179-188, feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>.

GODOY, L. G. G.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R.; DALT, S.; GOMES, L.B. Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. *Case Studies in Construction Materials*, v.12, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00329>.

GRANDE, F. M. *Fabricação de tijolos modulares de solocimento por prensagem manual com e sem a adição de sílica ativa*. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003. 180p. (Tese, Doutorado em Arquitetura).

HALLAL M.; SADE. S.; NAJJAR.S. Evaluation of engineering characteristics of stabilizes rammed-earth material sourced from natural fines-rich soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.30, n. 11, 2018.

HEREK, L. C. S.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C.R. G.; UEMURA, V. O.; PANCOTTE, L. P. Estudo da solidificação/estabilização do lodo da indústria têxtil em material cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v. 10, n.4, ago.2005.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. An introduction to Geotechnical Engineering. 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2010. 884p.

INTERNATIONAL ORHANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO, *Pensilvânia*. ISO 9869: Thermal insulation - Building elements - In - situ meausurement of thermal resistance and thermal transmittance, Pensilvânia, 2018. 31p.

JONES, H.; BOGER, D. V. Sustainability and waste management in the resource industries. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 51, n. 30, p. 10057–10065, mar. 2012. <https://doi.org/10.1021/ie202963z>.

KINNUNEN, P.; KAKSONEN, A. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*, v. 228, p153-160, aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>.

KLEIN, C., DUTROW, B. *Manual de Ciências dos Minerais*. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 713p.

KULAKOWSKI, M. P., BREHM, F., KAZMIERCZAK, C. S., MACIEL, E. F., LUNCKES, M. Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização. In: KAZMIERCZAK, C. S., FABRÍCIO, M. M. *Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade*. 1 ed. São Carlos: SCIENZA, 2016. Capítulo 3, p.37-76.

KULKARNI, V. V.; GOLDER, A. K.; GHOSH, P. K. Production of composite clay bricks: a value-added solution hazardous sludge through effective heavy metal fixation. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 391-400, mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.187>.

LADEIRA, A. C. Q.; CIMINELLI, V. S. T.; NEPOMUCENO, A. L. Selção de solos para a imobilização de arsênio. *REM: Revista da Escola de Minas*, v. 55, n. 3, p. 215-221, jul. 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672002000300009>.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 169-176, jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000200009>.

LIMA, D. P. *Ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário em Bloco d Terra Compactada (BTC)*. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2017. 117p. (Mestrado em Engenharia Civil).

LIMA, E. B.N. R.; MODESTO, P.F.; MOURA, R.M. P. Diagnóstico técnico-participativo. In: LIMA, E. B.N. R.; MODESTO, P.F.; MOURA, R.M. P. *Plano Municipal de Saneamento Básico: Peixoto de Azevedo-MT*. 1. ed. Cuiabá: EdUFMT, 2018. Capítulo 3, p. 56-74.

LIMA, F. X. R. *Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduos de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações*. Brasília: Universidade de Brasília, 2013. 128p. (Tese, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo).

LINS, F. A. F. L.; MONTE, M. B. M. Flotação de ouro. In: CHAVES, A. P. *A Flotação no Brasil*. 3 ed. Oficina de Textos, 2013. Capítulo 6, p. 158 -192 .

LOZANO, F. A. E. *Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando O Método De Análise Hierárquica*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 142p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Geotécnica).

LOWELL, S.; SHIELDS, J. E. *Powder Surface Area and Porosity*. 3. ed. 1991. SPRINGER. 252p.

LU, X.; MEMARI, A. M. Comparative study of Hot Box Test Method using laboratory evaluation of thermal properties of a given building envelop system type. *Energy & Buildings*, v. 178, p.130-139, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.044>.

LUZ, A. D.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. *Tratamento de minérios*. 6. ed. Rio de Janeiro. CETEM, 2018. 927p.

MALATSE, M.; NDLOVU, S. The viability of using the Witwatersrand gold mine tailings for brickmaking. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 115, p. 321-327, apr. 2015.

MANSOUR, M. B.; JELIDI, A.; CHERIF, A. S.; JABRALLAH, S. B. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, v. 104, p. 44-51, feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>.

MANSOUR, M. B.; OGAM, E.; JELIDI, A.; CHERIF, A.; JABRALLAH, S. B. Influence of compaction pressure on the mechanical and acoustic properties of compacted earth blocks: An inverse multi-parameter acoustic problem. *Applied Acoustics*, v. 125, p.128-135, oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.04.017>.

MARTA, J. M. Caracterização de garimpos em Mato Grosso. *Revista de Estudos Sociais*, v. 2, n. 2, p. 65-77, dez.2000.

MASSARO, L.; THEIJE, M. Understanding small-scale gold mining practices: Na anthropological study on technological innovation in the Vale do Rio Peixoto (Mato Grosso, Brazil). *Journal of Cleaner Production*, v. 204. p. 618 - 635, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.153>.

MATOS, M. *Simulação Computacional do Desempenho Térmico de Residências em Florianópolis Utilizando a Ventilação Natural*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. 108p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Microestrutura do Concreto. In: MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 4. ed. São Paulo: Ibracon, 2014, capítulo 2, p.21-47.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME, *Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental de Mineração em Pequena Escala (MPE) no Brasil*. 2018. Relatório Final (Relatório 8, 229p.). São Paulo: Projekt-Consult/RCS Global. Disponível em: <<http://mineracao.nap.usp.br/pt-br/projetos/projetos-4/pesquisa-aplicada/item/diagnostico-socioeconomico-e-ambiental-de-mineracao-em-pequena-escala-mpe-no-brasil>>. Acesso em janeiro de 2021.

MINKE, G. *Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1.ed. Berlin: Birkhauser Basel, 2006. 199p.

MKAOUAR, S.; MAHERZI, W.; PIZETTE, P.; ZAITAN, H.; BENZINA, M. A comparative study of natural Tunisian clay types in the formulation of compacted earth blocks. *Journal of African sciences*. v. 160, dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103620>.

MOHAMAD, G.; MACHADO, D. W. N.; JANTSCH. *Alvenaria Estrutural: Construindo conhecimento*. 1. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2017. 167p.

MOTTA, J. C. S. S.; MORAIS, P. W. P.; ROCHA, G. N.; TAVARES, J. C. ; GONÇALVES, G. G.; CHAGAS, M. A.; MAGESTE, J. L.; LUCAS, T. P. B. Soil-cemet brick: Analysis of Physical and economic feasibility of sustainable construction techniques. *E-xacta*, v.7, n.1, p.13-26. 2014. <http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v7i1.1038>.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, ONUBR, *Com o ritmo de consumo atual, mundo teria que produzir 60% mais alimentos e 40% mais água em 2050*, 2019. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/fao-se-o-atual-ritmo-de-consumo-continuar-em-2050-mundo-precisara-de-60-mais-alimentos-e-40-mais-agua/>>. Acesso em julho de 2020.

NAGARAJ, H. B.; SHREYASVI, C. Compressed stabilized earth blocks using iron mine spoil waste – An explorative study. *Procedia Engineering*, v. 180, p. 1203-1212, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.281>.

NICOLAU, V. P., GÜTHS, S., SILVA, M. G. “Thermal conductivity and specific heat measurement of low conductivity materials using heat flux meters”, In: XVI European Conference on Thermophysical Properties, p. 1 - 4, London. *Anal...* London: European Conference on Thermophysical Properties, 2002, p. 1 - 4.

NEVES, O. S. C.; SOUZA, A. S.; COSTA, M. A.; SOUSA, L. A.; VIANA, A. E. S.; NEVES, V. B. F. Persistência do cianeto e estabilização do pH em manipueira. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*. v.08, n.01, p. 1274-1284, 2014.

OLENDER, M. C. H. L. *A técnica do Pau-a-pique: subsídios para a sua preservação*. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2006. 94p. (Dissertação, Mestrado em arquitetura).

OLIVEIRA, D. R. P. *O depósito de Au Porteira, Peixoto de Azevedo (MT): geologia, petrologia, geocronologia U-Pb e metalogênese*. Brasília: Universidade de Brasília, 2017. 97p. (Dissertação, Mestrado em Geociências).

OLIVEIRA, L. D. S. *Avaliação dos Limites das Propriedades Térmicas dos Fechamentos Opacos da NBR 15220-3 Para Habitações de Interesse Social, da Zona Bioclimática 2*. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2012. 156p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo).

PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P.; IZELI, R.L. Reutilização de resíduo sólido industrial, constituído por areias de fundição, na fabricação de tijolos maciços e peças decorativas. *Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo*, v. 10, n. 2, p. 112-125, 2009. <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i10p112-125>.

PACHECO-TORGAL, F. P.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and building materials*, v. 29, p. 512-519, apr.2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>.

PADILHA, F. J.; SILVA, M. S.; GUIMARÃES, R. S.; CEDANO, J. C. C.; OLIVEIRA, D. M.; DAMACENO, J. B. D.; ACHETE, C. A.; FALCÃO, N. P. S. Uso da espectroscopia Raman e FT-IR na caracterização do biocarvão em latossolo amarelo da Amazônia central.

Revista virtual de química, v. 9, n. 5, p. 1996-2006, setembro, 2017. <https://10.21577/1984-6835.20170118>.

PASSOS, F. A. C.M.; CASTILHOS, Z.C.; CESAR, R.G.; NOGUEIRA, F. A. Avaliação ecotoxicológica de rejeitos de ouro com base em bioensaios com oligoquetas edáficos. XXV Jornada de Iniciação Científica, 2018, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: CETEM, 2018. p. 1-4.

PASSOS, F. A. C.M.; CASTILHOS, Z.C.; SILVA, V.P.R. Caracterização química e mineralógica de rejeitos da mineração do ouro. XXIV Jornada de Iniciação Científica, 2016, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: CETEM, 2016. p. 56-60.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. *Introdução à espectroscopia*. 4.ed. Bellingham: CENGAGE Learning, 2010. 708p.

PINHEIRO, B. C. A. *Processamento e caracterização de massas cerâmicas incorporadas com o resíduo borra de petróleo encapsulada para fabricação de grês porcelanato*. Campo dos Goytacazes: Universidade Estadual do norte Fluminense, 2009. 215p. (Tese, Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais).

PINTO, C. D. S. Compactação dos solos. In: PINTO, C. D. S. *Curso básico de mecânica dos solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006, capítulo 4, p. 77-88.

PIQUÉ, T. M.; VÁZQUEZ, A. Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, v. 3, n.2, p.62-71, jun. 2012.

QUANTACHROME, 2019 Catálogo Quantachrome Instruments: Gas Pycnometers. Bonynton Beach. Disponível em: <https://www.quantachrome.com/pdf_brochures/07171_Gas_Pyc.pdf> Acesso em maio de 2019.

RAMOS, L.F.; STURM, T.; LOURENÇO, P. B.; CAMPOS-COSTA, A. Construir com blocos de terra compactada em países sísmicos. In: *Paredes de Alvenaria*, Lisboa, 2015. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/38940/1/LFRamos%20et%20al_Semin%C3%A1rio%20Paredes%20de%20Alvenaria%202015%20V2.pdf>. Acesso em janeiro de 2021.

RASOOLI, A.; ITARD, L. In-situ characterization of walls' thermal resistance: An extension to the ISO 9869 standard method. *Energy & Buildings*, v. 179, p.374-383, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.004>.

REIS, F. M. D., RIBEIRO, P. R., REIS, M. J., REIS, J. C., FRANCKLIN. I. JR., Estudo de dosagem para confecção de tijolo solo-cimento utilizando rejeitos de quartzito como agregado miúdo, In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos. *Anais...* São Carlos: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2019. p. 49-56.

RITCEY, G. M. Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, v. 78, p. 3-20, jan. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.01.001>.

RIVEIRA, J.; COELHO, J.; SILVA, R.; MIRANDA, T.; CASTRO, F.; CRISTELO, N. Compressed earth blocks stabilized with glass waste and fly ash activated with a recycled alkaline cleaning solution. *Journal of Cleaner Production*, out., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124783>.

ROY, S.; ADHIKARI, G. R.; GUPTA, R. N. Use of gold mill tailings in making bricks: a feasibility study. *Waste Management & Research*, v. 25, n. 5, p. 475 – 482, oct. 2007. <https://doi.org/10.1177/0734242X07076944>.

RUBIANO, H. V.; CAICEDO, H. V. El Terraconcreto en Colombia: Apuntes para su historia. *Revista Uniandes*, v.1, may.2007. <https://doi.org/10.18389/dearq1.2007.14>.

SAMEH, S. H. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. *Journal of cleaner production*, v. 65, p. 362-373, feb. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.046>.

SCHEINHERROVÁ, L. *Characterization of hydration processo f cement pastes by means thermal analysis*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2018. 193p. (Thesis, Doctoral study programme in Material Engineering).

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, CPRM, *Mina: como ser dono de uma*, 2016. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Mina%3A-como-ser-dono-de-uma-1268.html?from_info_index=16>. Acesso em outubro de 2018.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, CPRM, *Geologia do craton Amazônico*, 2005. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/Cap2_Geologia_Craton_Amazonico.pdf>. Acesso em dezembro de 2020.

SÉMON, P.; MÜLLER, D. G. *Architecture en terre d'aujourd'hui: Les techniques de la terre crue*. 1. ed. Paris: CRAterre, 2016. 112p.

SGS GEOSOL. Au, Pt, Pd por ensaio de fogo. [online] Disponível em: <<https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/mining/analytical-services/geochemistry/precious-metals/au-pt-pd-by-fire-assay>>. Acesso em maio de 2020.

SILVA M. A., MATER L., SOUZA-SIERRA, M. M., CORRÊA, A. X., SPERB, R., RADETSKI, C. M. Small hazardous waste generators in developing countries: use of stabilization/solidification process as an economic tool for metal wastewater treatment and appropriate sludge disposal. *Journal of Hazardous Materials*, v. 147, n. 3, p. 986-990, aug. 2007. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.128>.

SILVEIRA, B. I.; BLASQUES, J.; SANTOS, R. Effectiveness of cement-based systems for stabilization and solidification of spent pot liner inorganic fraction. *Journal of Hazardous Materials*, n. 98, n. 1-3, p. 183-190, mar. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00317-5).

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. *Principles of Instrumental Analysis*. 6. ed. Thomson Brooks/Cole, 2006. 1032p.

SOARES, E.; SILVA, R. A.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D. V.; LEITÃO, D.; CRISTELO, N.; OLIVEIRA, J. *Mechanical Performance of Masonry made with CEB stabilised by alkali activated fly ashes*. In: Congresso Nacional de Geotecnia, 2016. Porto. *Anais...* Porto: Congresso Nacional de Geotecnia, 2016.

SOUZA, Al.; CLEMENTE, A. *Decisões financeiras e análise de investimentos*. 6 ed. São Paulo: Atlas. 2012. 200p.

SOUZA, F. A. *Estudo da durabilidade de blocos de solo-cimento com incorporação de casca de arroz*. Paraíba: Universidade Federal de Campina Grande, 2011. 223p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Processos).

SOUZA, J. M. *Tijolos de solo-cimento produzidos com manipueira em substituição à água*. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019. 81p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

SOUZA, M. I.B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J.A. Tijolos de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.205-212, sep. 2007.

TAYEBI-KRORAMI, M.; EDRAKI, M.; CORDER, G.; GOLEV, A. Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. *Minerals*, v.9, n. 9, may. 2019. <https://doi.org/10.3390/min9050286>.

TESCHNER, B.; SMITH, N. M.; BORILLO-HUTTER, T.; JOHN, Z. Q.; WONG, T. E. How efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miner's gravity separation systems. *Minerals Engineering*, v. 105, p. 44 - 51. 2017. jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.005> .

TSUTIYA, M. T. Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgoto. In: 20^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. p.1-9.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. *REM - Revista da Escola de Minas*, v. 63, n. 2, jun. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000200019>.

UNITED NATIONS. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, 2015. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>> Acesso em: outubro de 2019.

VAIDYA, R., KODAM, K., GHOLE, V. RAO, K. Validation of an in situ solidification/stabilization technique for hazardous barium and cyanide waste for safe disposal into a secured landfill. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 9, p. 1821-1830, sep.

2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.002>.

VEIGA, M. M.; BAKER, R. *Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners*. United Nations publications; 2004.

VIANA, M. B. *Licenciamento ambiental de minerações em Minas Gerais: novas abordagens de gestão*. Brasília: Universidade de Brasília, 2007. 305p. (Dissertação, Mestrado em Desenvolvimento Sustentável).

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Characteristics and effect of the granulometric fraction $< 2\mu\text{m}$ on the firing behavior of a clay. *Cerâmica*, São Paulo, v. 53, p249-254, maio. 2007. doi: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132007000300006>.

VIEIRA, G. H. V. *Avaliação de blocos de solo-cimento utilizando o solo de Pato Branco corrigido com areia natural ou areia de britagem*. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. 80p. (Monografia, Graduação em Engenharia Civil).

VILELA, A. P., EUGÊNIO, T. M. C., OLIVEIRA, F.F., MENDES, J. F., RIBEIRO, A. G. C., VASCONSELLOS, L. E., MENDES, R. F., Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste, *Construction and Building Materials*, v. 262, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. *Pavimentos econômicos: tecnologia de uso dos solos finos lateríticos*. 1. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009, p. 291.

ZHANG, L.; GUSTAVSEN, A.; JELLE, B. P.; YANG, L.; GAO, T.; WANG, Y. Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, v.151, p. 504-511, 2017, oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047>.

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials – A review. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 643-655, oct. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>.

ZHOU, X. Y.; YU, Y. Z.; HE, S. X.; LI, Q., Study on Production of Burning-Free Brick Using Chinese Kuancheng Iron Ore Tailings, *Advanced Materials Research*, v. 511, p. 146–149, apr. 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.511.146>.

WILLS, B.A.; NAPIER – MUNN, T. J. *Will's mineral processing Technology*. 7. ed. Elsevier Science & Tehnology books. 2006. 450p.

ANEXO I

As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 do Capítulo 3, que trata da revisão bibliográfica sobre construção em terra, foram construídas especialmente para o presente texto pela autora e pelo graduando em Engenharia de Minas Vítor Rodrigues Alves Soares, cuja Iniciação científica no segundo semestre de 2018 foi realizada em parceria com esta pesquisa de doutorado. Seguem as fontes utilizadas e acessadas em outubro de 2018:

- Para a construção da Figura 3.6 (Exemplos de construção em terra no Brasil) foram utilizadas as imagens:

- Senzala de pau a pique: Disponível em: <https://ensinarhistoriajoelza.com.br/para-colorir-fazenda-de-cana-do-brasil-colonia/07_casa-de-negros/>.

- Engenho Feito em Taipa. Disponível em: <<https://ensinarhistoriajoelza.com.br/para-colorir-fazenda-de-cana-do-brasil-colonia/>>.

- Casa de Pau a Pique. Disponível em: <<https://meioseculodeaprendizagens.blogspot.com/2018/03/construcao-de-casas-em-pau-pique.html>>.

- Igreja colonial em taipa:. Disponível em: <<https://www.morroalto.tur.br/atrativos/nome/Igreja+Matriz+de+Nossa+Senhora+do+Ros%C3%A1rio>>.

- Para a construção da Figura 3.7 (Exemplos de construção em terra no continente Asiático, Africano e Europeu) foram utilizadas as imagens:

- Arco de Ctesifonte. Disponível em: <https://www.taringa.net/+imagenes/el-arco-de-ctesifonte-en-irak_htbkj>.

- Muralha da China. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/muralha-da-china/>>.

- Manhattan do deserto. Disponível em: <<https://www.fotosearch.com/AGE063/xz1-1068741/>>.

- Torre de Babel. Disponível em: <<https://verdadedededeus.wordpress.com/2012/06/03/a-torre-de-babel-e-pentecostes/>>.

- Ait Ben Haddou. Disponível em: <<http://keepcalmandwander.com/ait-benhaddou-morocco-movie-location/>>.

- Timimoun. Disponível em: <https://falandonalata1.wordpress.com/2015/11/06/recriar-com-voce-habitat-_/>.

- Templo de Ransés II. Disponível em: <<https://www.tripadvisor.pt/LocationPhotoDirectLink-g297540-d317826-i296578000-AbuSimbelTempleComplex-AbuSimbelAswanGovernorateNileRiverValleyhtml>>.

- Vale do Draa. Disponível em: <<http://www.marraquexe.net/excursos/excursao-deserto-saara-marrakech/>>.

- Palácio Alhambra. Disponível em: <<http://www.espanha-turismo.com/granada/granada.htm>>.

- Casa em Taipa na França, séc XX: FRANKE, L. N. *Arquitetura Contemporânea em Terra: modos de ver e fazer*. Porto: Universidade do Porto, 2017. 237p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

• Para a construção da Figura 3.8 (Exemplos de construção em terra na América do Sul, na América do Norte e na Oceania) foram utilizadas as imagens:

- Huaca del Sol. Disponível em: <<https://delange.org/SunMoonTemple/SunMoonTemple.htm>>.

- Chan Chan. Disponível em: <<https://www.dosmanosperu.com/pt/destinos/trujillo/chan-chan/>>.

- Taipa na Construção de Casas. Disponível em: <<http://futuraarquitetos.com.br/arquitetura-de-taipa-de-pilao-parte-1/>>.

- Casa em Taipa na Austrália, séc XX: FRANKE, L. N. *Arquitetura Contemporânea em Terra: modos de ver e fazer*. Porto: Universidade do Porto, 2017. 237p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

- Layer House. Disponível em: <<https://www.yellowtrace.com.au/layer-house-victoria-robson-rak/>>.

• Para a construção da Figura 3.9 [Diagrama simplificado dos diferentes grupos de sistemas construtivos que utilizam a terra como matéria-prima (Monolítica, Alvenaria, Por Enchimento e Revestimento e Sistemas de ligação)] foram utilizadas as imagens:

a) Para a técnica de revestimento e enchimento:

- Terra de cobrimento: Disponível em: <<http://www.vaicomtudo.com/como-construir-uma-parede-de-pau-pique.html>>.

- Terra de guarnição: FERREIRA, C. C. *A Sustentabilidade do Sistema Construtivo em Terra: Um Projeto de Reabilitação*. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2012. 99p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

- Terra de enchimento: Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-745765573-saco-hiperadobe-bobina-500-m-adobe-construco-casa-ecologica-_JM>.

- Terra palha: Disponível em: <<http://terrapalha.blogspot.com/2014/10/a-nossa-mais-recente-obra-construida.html>>.

b) Para a técnica de alvenaria:

- Máquina para Terra Extrudada: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=zLHGMEHITGY>>.

- BTC: Disponível em: <<https://forumdacasa.com/discussion/49245/tijolo-ecologico-modular/>>.
- Adobe: Disponível em: <<http://www.universidadegratis.com.br/site/arquivo/16105/cursos-virtuais/outros-cursos/construcao-civil-em-adobe.html>>.

c) Para a técnica monolítica:

- Terra Plástica, Terra escavada, COB e Taipa: FERREIRA, C. C. *A Sustentabilidade do Sistema Construtivo em Terra: Um Projeto de Reabilitação*. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2012. 99p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

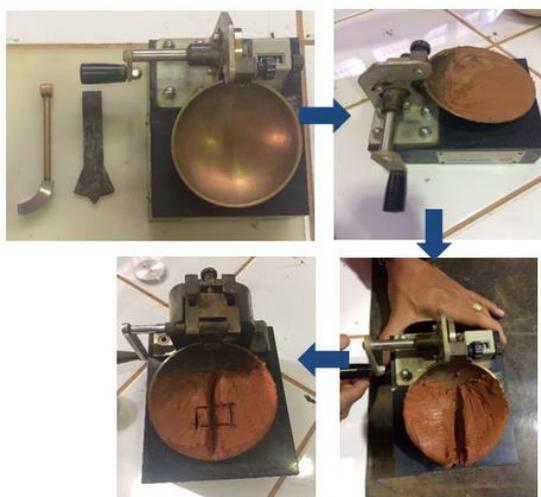
d) Para a técnica sistema de ligação:

- Sistema de ligação: FERREIRA, C. C. *A Sustentabilidade do Sistema Construtivo em Terra: Um Projeto de Reabilitação*. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2012. 99p. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

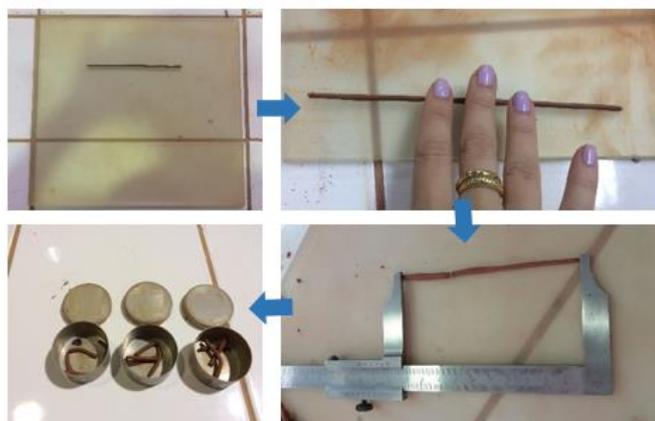
ANEXO II

A caracterização geotécnica do rejeito de ouro terá aqui as suas técnicas e/ou materiais ilustrados. As imagens foram tiradas para a confecção do presente trabalho.

- Seguiu-se a NBR 6459 (ABNT, 2016) para a determinação do Limite de Liquidez. A imagem a seguir traz a execução do ensaio no aparelho Casagrande:



- A NBR 7180 (ABNT, 2016) norteou os procedimentos para a determinação do Limite de Plasticidade. A imagem a seguir traz o fluxograma de execução do ensaio aonde observa-se o gabarito e a placa de vidro fosca; o preparo do cilindro; a medição do comprimento do cilindro; e o armazenamento das amostras nas cápsulas.



- Para o ensaio de Compactação de solo-cimento a norma NBR 12023 (ABNT, 2012) foi seguida. A foto abaixo ilustra os equipamentos utilizados (cilindro e soquete) e também o fluxograma do ensaio com a homogeneização do solo com acréscimo de água; compactação; raspagem do excesso de água; e corpo de prova pronto.



ANEXO III

Seguem em anexo os difratogramas obtidos na análise DRX para o rejeito e o solo.

