CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET-MG

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

LAURA BORGES COSTA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FILITO

Araxá

2022

Laura Borges Costa

ESTUDO DE VIABILIDADE DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FILITO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do CEFET-MG, na área de concentração de Engenharia de Minas, na Linha de Pesquisa em Processamento de Minérios e Rejeitos como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez

Co-orientadora: Drª. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares

Araxá

2022

ATA DA 4ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 29 (vinte e nove) dias do mês de junho do ano de 2022 (dois mil e vinte dois), às 8h30min (oito horas e trinta minutos), através da Plataforma Microsof TEAMS,foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação da Mestranda LAURA BORGES COSTA, *por meio de participação remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pelo Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez(Presidente) – CEFET-MG, Profª. Drª. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares (Membro interno - Coorientadora) – CEFET-MG ,Profª. Drª. Delma Pereira Caixeta (Membro externo ao programa) – CEFET-MG e Prof. Dr. Fábio de São José (Membro interno) – CEFET-MG.

Dando início aos trabalhos o Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu à Mestranda ***Laura Borges Costa***, até 40 (quarenta) minutos para a apresentaçãodo seu trabalho intitulado "ESTUDO DE VIABILIDADE DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FILITO", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Processamento de Minério e Rejeitos*. Terminada a exposição, o Presidente da Banca examinadora passou a arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que a Mestranda foi aprovada com recomendações, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela Mestranda.

Araxá, 29 de junho de 2022

Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez
Presidente (CEFET-MG)

Profª. Drª. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares
Membro interno - Coorientadora (CEFET-MG)

Profª. Drª. Delma Pereira Caixeta
Membro externo (CEFET-MG)

Prof. Dr. Fábio de São José
Membro interno (CEFET-MG)

Engª Laura Borges Costa
Discente

Emitido em 30/06/2022

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 3/2022 - DMCAX (11.57.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 08:40)
ALEXANDER MARTIN SILVEIRA GIMENEZ
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTMINAX (11.50.20)
Matrícula: 2152246

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 10:32)
DELMA PEREIRA CAIXETA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAX (11.57.04)
Matrícula: 1571951

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 12:32)
FABIO DE SAO JOSE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAX (11.57.04)
Matrícula: 3063139

(Assinado digitalmente em 04/07/2022 09:45)
MARCELA MAIRA NASCIMENTO DE SOUZA SOARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAX (11.57.04)
Matrícula: 2579044

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 19:23)
Laura Borges Costa
DISCENTE
Matrícula: 20195006470

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: **3**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **30/06/2022** e o código de verificação: **204d2110ea**

Costa, Laura Borges
C838e Estudo de viabilidade de argamassa com adição de filito / Laura Borges Costa. – 2022.
86 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez
Co-orientadora: Profa. Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.
Bibliografia.

1. Mineração – Impactos ambientais – Teses. 2. Industrias minerais – Desenvolvimento sustentável – Teses. 3. Argamassa – Teses. 4. Filito – Teses. I. Gimenez, Alexander Martin Silveira. II. Soares, Marcela Maira Nascimento de Souza III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622:502.131.1

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG

Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB6-1713

FOLHA DE APROVAÇÃO

LAURA BORGES COSTA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FILITO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia de Minas.

Data de aprovação: 07 / 10 / 2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez – CEFET - MG

Profª. Drª. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares – CEFET - MG

Prof. Dr. Fábio de São José – CEFET - MG

Profª. Drª. Delma Pereira Caixeta– CEFET - MG

RESUMO

A mineração tem grande peso na economia mundial, sendo responsável pela geração de diversos empregos diretos e indiretos. Apesar disso, a indústria mineira esbarra em uma questão recorrente e inerente ao processo: a geração de resíduos. Ações de sustentabilidade ambiental vêm sendo adotadas em diferentes linhas de produção a fim de reduzir os impactos envolvendo principalmente a geração e estocagem desses resíduos. Com isso, a proposta do trabalho é aplicar o filito, rocha abundante no Brasil, porém muitas vezes considerado estéril de mineração, em argamassas como substituinte de aglomerante (cal) e de agregado miúdo, sem que a presença do filito altere as propriedades da argamassa, objetivando a inserção no mercado de um novo produto com bom desempenho técnico e economicamente viável. Para isso foram realizados testes laboratoriais seguindo as normas nacionais, totalizando um traço padrão e cinco substituições. A argamassa foi dosada de forma tradicional nas proporções 1:1:6 em volume para cimento, cal e areia. As substituições foram classificadas conforme o material a ser substituído. Dessa forma, foram realizadas substituições de agregado miúdo por diferentes faixas granulométricas de filito, mantendo um valor máximo de substituição igual a 50%, tal como substituições de cal em quantidades iguais a 37,5% e 75. Corpos de prova cilíndricos de diâmetro por altura igual a 5x10 cm e cúbicos de 5x5x5 cm foram moldados a fim de realizar testes de resistência à compressão uniaxial, permeabilidade, densidade no estado endurecido, bem como testes de retenção de água, densidade no estado fresco e teor de ar incorporado. Além disso a argamassa foi aplicada em parede chapiscada, a fim de analisar o seu desempenho e executar o teste de permeabilidade. A partir da realização dos testes foi possível constatar que a presença do filito na argamassa melhora as propriedades analisadas, tais como a resistência à compressão uniaxial, permeabilidade, densidade em estado fresco e endurecido, e retenção de água quando comparadas com a argamassa padrão, em especial nas substituições compostas por 100% de cal e 50% de filito como agregado miúdo, e 37,5% de filito como substituinte de cal e 50% de filito como substituinte de agregado miúdo.

Palavras-chave: geração de resíduos, pilha de estéril, sustentabilidade ambiental, argamassa, filito.

ABSTRACT

Mining has a huge influence on the world's economy, being responsible for the generation of several direct and indirect jobs. However, mining collides with a recurrent and inherent process in the industry: waste generation. Environmental sustainability actions have been adopted in different production line aiming to reduce the impacts involved on the generation and storage of that waste materials. Therefore, the goal of this project is to apply phyllite, an abundant rock in Brazil, and often considered as a waste of mining, in mortars as a substitute for binder (lime) and fine aggregate, without changing the properties of the mortar due to the presence of the phyllite, and aiming inserting in the market a new product with good technical performance and economic viability. For this, laboratory tests were carried out following national standards, totaling a standard mix and five replacements. The mortar was traditionally dosed in the proportion of 1:1:6 in volume of cement, binder and sand. The replacements were classified according the material it will undertake. Consequently, the fine aggregate was replaced by different granulometric ranges of phyllite retaining the maximum amount of substitution equal to 50%. Also, the binder were replaced by 37.5% and 75% of the phyllite. Cylindrical specimens of 5x10 cm and squares of 5x5x5 cm were molded in order to perform uniaxial compressive strength, permeability, hardened state density tests, as well as water retention tests, fresh density tests and air-entrained incorporation. Furthermore, the mortar was applied to a roughened wall in order to analyze its performance and perform the permeability test. Through the tests' preformation, is possible to conclude that the presence of phyllite on the mortar improves the analyzed properties such as uniaxial compressive strength, permeability, hardened state density tests, water retention tests, fresh density tests when compared with the standard mortar, especially the substitutions compounded by 100% of binder and 50% de phyllite as a fine aggregate replacement; and 37,5% de phyllite as a binder replacement and 50% de phyllite as a fine aggregate replacement.

Keywords: waste generation, waste rock pile, environmental sustainability, mortar, phyllite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa do Índice de Contribuição Mineral 6
Figura 2 - Sumário das principais exportações 8
Figura 3 - Classificação dos resíduos sólidos 13
Figura 4 - Áreas de operação da Ecologia Industrial 18
Figura 5 – Pesquisas de aplicação de filito 25
Figura 6 – Imagens aéreas do empreendimento mineiro em 2016 (à esquerda) e em 2019 (à direita) 31
Figura 7 - Vista superior da planta de britagem e instalações 32
Figura 8 - Bancadas de calcário, estéril e matéria orgânica 33
Figura 9 - Granulometria inicial 34
Figura 10 - Fluxograma da etapa de cominuição 35
Figura 11 - Carga moedora 35
Figura 12 - Pilha alongada 36
Figura 13 - Peneirador e sequência de peneiras 37
Figura 14 - Pilhas alongadas 38
Figura 15 - Picnometria 39
Figura 16 - Picnometria da cal 41
Figura 17 - Determinação da massa específica do cimento 42
Figura 18 - Determinação da massa específica do agregado miúdo 43
Figura 19 – Molde de corpos de prova cúbicos 48
Figura 20 – Molde de corpos de prova cilíndricos 49
Figura 21 - Teste de permeabilidade em blocos cúbicos 50
Figura 22 - Equipamentos utilizados no teste de retenção de água 53
Figura 23 - Aplicação em parede 55
Figura 24 - Teste de permeabilidade na aplicação em parede 56
Figura 25 - Copos de prova cúbicos 58
Figura 26 - Corpos de prova cilíndricos 59
Figura 27 - Teste de densidade em estado fresco substituições A0 60
Figura 28 - Teste de densidade em estado fresco substituições A1 60

Figura 29 - Resultado do teste de densidade em estado endurecido substituições A0 62
Figura 30 - Resultado do teste de densidade em estado endurecido substituições A1 62
Figura 31 - Resultado do teste de retenção de água substituições A0 63
Figura 32 - Resultado do teste de retenção de água substituições A1 64
Figura 33- Resultados do teste de resistência à compressão uniaxial substituições A0 65
Figura 34 - Resultados do teste de resistência à compressão uniaxial substituições A1 65
Figura 35 - Resultado do teste de permeabilidade substituições A0 66
Figura 36 - Resultado do teste de permeabilidade substituições A1 67
Figura 37 - Aplicação na parede chapiscada.....68
Figura 38 – Comparação da aplicação na parede após 360 dias (esquerda) e 28 dias de cura (direita).....69
Figura 39- Resultado do teste de permeabilidade em parede chapiscada substituição A0.....71
Figura 40 - Resultado do teste de permeabilidade em parede chapiscada substituição A1.....72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico da legislação de barragens 11
Tabela 2 - Estudos de aplicação de rejeito de ferro 22
Tabela 3 - Faixa granulométrica 37
Tabela 4 - Frações de material por granulometria 45
Tabela 5 - Substituições realizadas 46
Tabela 6 - Massas específicas e unitárias 58
Tabela 7 - Teor de ar incorporado 61
Tabela 8 - Resultados sumarizados 73
Tabela 9 - Análise dos resultados 73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$2CaO\text{-}SiO_2$ Silicato Bicálcico

$3CaO\text{-}SiO_2$ Silicato Tricálcico

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 Óxido de Alumínio

$Ca(OH)_2$ Hidróxido de Cálcio

$CaCO_3$ Carbonato de Cálcio

CaO Óxido de Cálcio

CO_2 Dióxido de Carbono

Fe_2O_3 Óxido de Ferro (III)

ICMM International Council on Mining & Metals

MgO Óxido de Magnésio

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

ROM Run Of Mine

SiO_2 Dióxido de Silício

SO_3 Óxido Sulfúrico

SUMÁRIO

RESUMO 5

ABSTRACT 6

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 7

LISTA DE TABELAS 9

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS 10

1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - Justificativa 2

1.2 - Objetivos 2

1.2.1 - Objetivos Gerais 2

1.2.2 - Objetivos Específicos 2

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 - Mineração e a geração de resíduos 4

2.1.1 - Histórico ambiental e mineral no mundo 4

2.1.2 - Histórico da mineração no Brasil 7

2.2 - Pilhas de estéril e as consequências ambientais 9

2.2.1 - Legislação 10

2.3 - Os resíduos da mineração 12

2.4 - Técnicas de reaproveitamento de resíduos 15

2.4.1 - Reciclagem e Reutilização 16

2.4.2 - Ecologia Industrial 16

2.4.3 - Simbiose Industrial 18

2.4.4 - Coprocessamento 19

2.5 - Aplicações industriais de resíduos da mineração 20

2.5.1 - Filito e suas Aplicações Industriais 23

2.6 - Argamassa 25

2.6.1 - Materiais Alternativos na Construção Civil 28

3 - MATERIAIS E MÉTODOS 30

3.1 - Materiais 30

3.2 - Preparação das amostras 33

3.3 - Caracterização do filito e constituintes da argamassa 39

3.3.1 - Caracterização do filito 39

3.3.2 - Caracterização dos constituintes da argamassa 41

3.4 - Caracterização da argamassa com adição filítica 44

3.4.1 - Moldagem dos corpos de prova cúbicos 47

3.4.2 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos 48

3.4.3 - Compressão uniaxial de corpos de prova 49

3.4.4 - Teste de permeabilidade 50

3.4.5 - Densidade em estado fresco e teor de ar incorporado 51

3.4.6 - Densidade em estado endurecido 52

3.4.7 - Retenção de água 53

3.4.8 - Aplicação em parede chapiscada 54

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 57

4.1 – Preparação das amostras 57

4.1.1 Análise visual 57

4.1.2 Caracterização do filito e dos componentes da argamassa 57

4.2 - Moldagem dos corpos de prova cúbicos 58

4.3 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos 58

4.4 - Densidade em estado frescos e teor de ar incorporado 59

4.5 - Densidade em estado endurecido 61

4.6 - Retenção de água 62

4.7 - Compressão uniaxial de corpos de prova 64

4.8 - Teste de permeabilidade 66

4.9 - Aplicação em parede chapiscada 67

4.10 Considerações gerais 73

5 - CONCLUSÕES 73

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 76

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE TRAÇO E MASSAS PARA CADA SUBSTITUIÇÃO 87

APÊNDICE B – CÁLCULOS 90

1 - INTRODUÇÃO

A evolução da mineração sempre esteve atrelada ao desenvolvimento humano. Foi a partir da necessidade por novos materiais, em especial de construção civil, que impulsionou o homem a conquistar novos locais e desenvolver tecnologias.

Com o avanço de técnicas e tecnologias na indústria, mineração e consciência ambiental começaram a entrar em conflito, uma vez que o beneficiamento de minérios de menores teores e granulometrias resultaram em uma maior geração de rejeitos. Atualmente a mineração exerce um grande papel em todo o mundo. Muitos países têm a mineração como uma das principais atividades industriais, geradoras de renda e emprego (ICMM, 2018).

No Brasil o desenvolvimento da mineração se deu de forma semelhante ao restante do mundo. Em 2019 a atividade foi responsável por gerar 195 mil empregos diretos, representando 12,5% das exportações realizadas pelo país (IBRAM, 2019).

Assim, como em toda atividade industrial, a atividade mineira também é responsável pelo depósito e manuseio dos resíduos gerados. Devido a diversos fatores, tais estruturas de armazenamento de resíduos podem entrar em colapso e resultar em acidentes, cujas consequências podem incluir prejuízos materiais, ambientais e sociais. Portanto, surgem ações que visam a reutilização, reaproveitamento dos resíduos da mineração e de todas as naturezas.

Dentre essas ações, podem ser citadas a reciclagem e o reaproveitamento, a ecologia industrial, a simbiose industrial e o coprocessamento, que se diferem quanto a técnica, objeto e local de atuação, porém se convergem no objetivo de dar ao resíduo uma destinação alternativa, buscando maior segurança e preservação ambiental (FIALHO; SOUZA, 2015; TANIMOTO, 2004).

Tendo em vista todos os problemas oriundos da disposição de resíduos em pilhas e barragens e todas as técnicas disponíveis para destinação alternativa de resíduos, a indústria mineral vem investindo em técnicas de reaproveitamento dos seus resíduos. Dentre os materiais em estudo, no Brasil, o rejeito de minério de ferro se destaca, visto a importância do minério e a grande quantidade de rejeito gerado no processo, bem como os últimos acidentes envolvendo barragens de tal material.

Quanto ao reaproveitamento da rocha filítica, a construção civil é a responsável por absorver a maior parte do material e contribuir para a grande maioria dos estudos de aproveitamento da rocha. Dentre as pesquisas, aplicações em cimento e argamassas se destacam. A razão para esses números é devido a um fator principal: as características físicas e químicas do material.

O objeto desse estudo é um filito oriundo da atividade mineira de calcário. O material se encontra na zona rural do município de Santa Rosa da Serra- MG e é manipulado pela empresa Mineração Dornas LTDA, cujo principal produto é calcário beneficiado para incorporação de britas para a construção civil. Nessa atividade, o filito se encontra como uma lente espessa sobre o calcário e seu manejo é necessário para que a atividade se realize. O filito é então lavrado por desmonte mecânico e depositado em pilhas de estéril.

1.1- Justificativa

Com base na busca por uma mineração cada vez mais sustentável, torna-se evidente a necessidade de pesquisas científicas que visem propor diferentes rotas de aproveitamento de materiais considerados como não economicamente viáveis pela mineração e geralmente depositados em pilhas e barragens. Desta forma, o trabalho propõe explorar formas de aplicar a rocha Filito na composição de argamassas de revestimento, seguindo metodologias descritas em normas e procedimentos usais em laboratórios.

1.2- Objetivos

1.2.1- Objetivos Gerais

O objetivo geral do trabalho foi buscar aplicações práticas para o filito, estéril da mina de calcário do município de Santa Rosa da Serra-MG, em argamassas de revestimento como substituinte de aglomerante (cal) e de agregado miúdo.

1.2.2- Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Fazer um levantamento bibliográfico justificando a importância ambiental da busca por novas alternativas para resíduos de mineração em especial para o filito;
- Estudar em traços de argamassa de revestimento convencional o comportamento em ensaios mecânico e estado fresco de diferentes proporções de substituições de cal e de agregado miúdo, levando em consideração suas características químicas, físicas e mineralógicas, a fim de reduzir a estocagem em pilhas de estéril;
- Tentar desenvolver um novo produto que seja economicamente viável e com desempenho técnico para ser inserido no mercado.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item contempla os estudos que foram utilizados para embasamento da pesquisa. Discorre sobre o histórico da indústria mineral mundial e brasileira, a geração de grandes volumes de resíduos decorrentes da extração mineral, bem como seu depósito, consequências ambientais, legislação vigente e seus tipos. São abordados também técnicas de reaproveitamento de resíduos, estudos sobre aplicações industriais de resíduos da atividade mineira, em especial rejeitos da mineração de ferro e filito. Por fim, são realizadas considerações quanto ao filito, material de estudo do trabalho, e argamassas.

2.1- Mineração e a geração de resíduos

2.1.1- Histórico ambiental e mineral no mundo

A evolução do homem sempre esteve bastante relacionada com a mineração. A necessidade de instrumentos para caça, armamentos bélicos e moradia fizeram com que o homem primitivo buscasse materiais alternativos e de melhor desempenho. Assim, as eras da humanidade conhecidas foram nomeadas à medida que o homem foi descobrindo e dominando novos materiais. Estima-se que em meados dos anos 600.000 A.C. o homem começava a ter domínio de rochas, caracterizado pela Idade da Pedra, utilizando pedras duras como quartizito e sílex encontradas facilmente na superfície para uso como objeto cortante, principalmente. No período Neolítico (Idade da Pedra Lascada) já se tem indícios de poços e galerias usados para mineração subterrânea de sílex. Nesse período eram utilizados instrumentos feitos de xisto, quartzo e ossos para auxiliar o desmonte de rocha. Em relação a mineração a céu aberto, estima-se que a mina de cobre na Sérvia, datada no fim do período Calcolítico e início do Bronze, seja uma das pioneiras, explorando o minério com o auxílio de seixos de rio, martelos primitivos e cestos de argila para o transporte do minério. Nesse caso, o cobre, assim como o ouro lavrado em leitos de rios, se apresentava na forma nativa e de fácil acesso. À medida que a utilização desses materiais se tornou mais ampla, problemas de escassez foram surgindo, levando a necessidade de tratar termicamente o mineral, por volta de 4500 A.C., e assim dando os primeiros passos em direção a metalurgia (BATATA, 2017; NAVARRO, 2006).

Os Romanos tiveram grande importância para a mineração pelo desenvolvimento de técnicas de beneficiamento mineral e metalúrgico, tal como a utilização de mercúrio na concentração de ouro. Apesar disso, foram também responsáveis por diversos danos ambientais, cujas consequências ainda podem ser identificadas. Pilhas de estéreis primitivas e estoques de seixos resultantes da mineração aluvionar, cones de dejeção e lamas resultantes do beneficiamento mineral são exemplos da herança da mineração romana (BATATA, 2017; GIL, 2014).

Apesar dos avanços anteriores, a Revolução Industrial foi responsável pelas maiores transformações econômicas e tecnológicas no mundo. Em meados do século XVIII, a Europa, e logo em seguida o mundo, foi palco da mecanização da produção, em especial na indústria têxtil, criação das máquinas a vapor, permitindo um grande avanço na indústria mineral, ampliação da utilização de combustíveis fósseis e revolução na agricultura pela inserção de novas técnicas e tecnologias. Aliado aos avanços, o período também foi marcado por um grande descaso ambiental e negligência com a saúde humana (OLIVEIRA, 2004; POTT; ESTRELA, 2017).

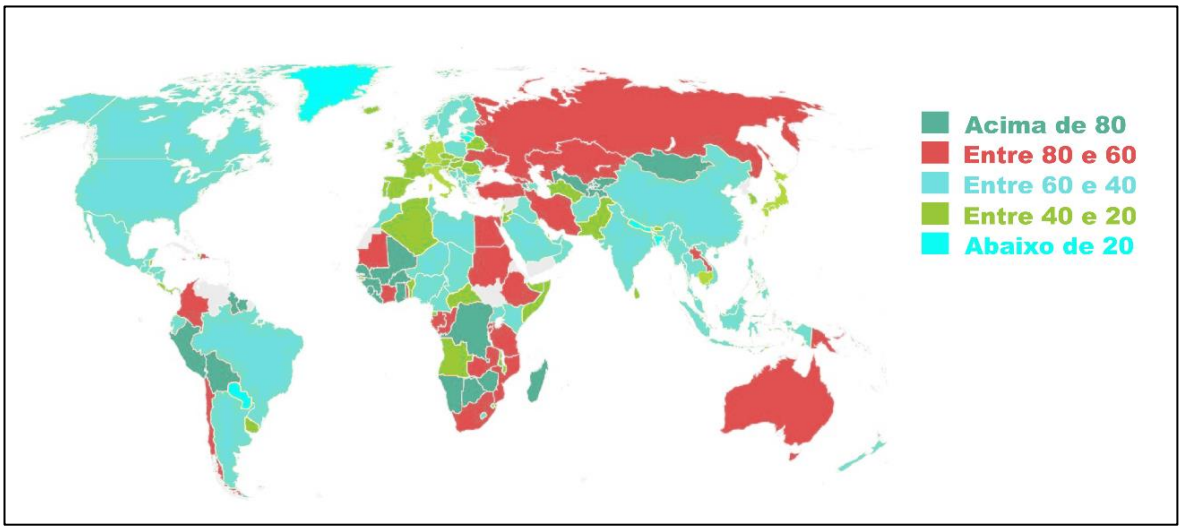
Outro grande impacto no desenvolvimento da mineração foi a utilização de pólvora como material explosivo e, em seguida, a dinamite, ambos associados aos avanços das técnicas de perfuração. Tais materiais começaram a ser empregados em meados do século XIX e são até hoje amplamente utilizados na etapa de lavra. Em relação a etapa de beneficiamento mineral, uma das principais inovações foi a flotação, que começou a ser utilizada na Austrália em 1905 em escala industrial (GIL, 2014).

Novas tecnologias foram essenciais para o crescimento do setor mineral. Portanto, vale ressaltar a importância da inserção de equipamento de maiores capacidades entre os anos de 1940 e 1970, permitindo o crescimento das usinas. Atualmente o conceito de automação e computação da produção é bastante difundido, porém a técnica de otimização de processos só foi empregada no período de 1970-1990 (GIL, 2014).

A mineração continua tendo um grande impacto na sociedade e na economia. O ICMM - International Council on Mining & Metals (2018) fez um levantamento da importância econômica da mineração em cada país, levando em consideração quatro fatores e classificando-a de acordo com nota de 0 a 100, sendo 0 a nota mínima da participação da mineração na economia do país e 100 a máxima influência da mineração na economia. Os fatores são: a

contribuição da exportação de minérios e metais no ano de 2016, a variação (aumento ou redução) na contribuição das exportações de minérios e metais entre os anos de 2011 e 2016, a relação (em porcentagem) do valor da produção mineral no PIB e a parcela (em porcentagem) do PIB das rendas minerais. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 1. Países que estão assinalados na cor cinza apresentaram valores de pontos iguais ou inferiores a dois.

Figura 1 - Mapa do Índice de Contribuição Mineral



Fonte: Adaptado de ICMM (2018)

Ao que diz respeito a preocupação ambiental, apenas três séculos após a Revolução Industrial começa a existir uma consciência ambiental. Após um grande nevoeiro sobre a cidade de Londres no ano de 1952, que causou mais de 4000 mortes, os ingleses introduziram a Lei do Ar Puro em 1956, inspirando outros países a aprovar leis de gerenciamento e qualidade ambiental. Outro evento de grande importância para o despertar da consciência ambiental foi a publicação do livro de Rachel Carson intitulado “Primavera Silenciosa” em 1962, no qual a autora expõe a relação entre o uso desenfreado de pesticidas e a saúde humana (BONZI, 2013; POTT; ESTRELA, 2017).

Surge então, uma preocupação por parte da população a respeito da poluição, esgotamento dos recursos naturais, crescimento populacional e da produção e consumo. É apresentado então à Organização das Nações Unidas (ONU) uma proposta para a realização de uma Conferência Mundial sobre Meio Ambiente Humano pelo governo sueco. Tal solicitação foi atendida e no ano de 1972 foi realizada a Conferência de Estocolmo e, pela primeira vez,

problemas ambientais foram discutidos por políticos, autoridades de governo, representantes da sociedade civil e a ONU. O evento foi essencial para o desenvolvimento de uma ferramenta de preservação ambiental, sendo a pioneira de outros eventos como Rio-92 e Rio+20 (PASSOS, 2009; RAMOS, 2001).

2.1.2- Histórico da mineração no Brasil

Nos primeiros anos após a descoberta do Brasil, as principais atividades mineiras estavam relacionadas a construção civil. Portanto, areia, argilas, cascalho e até mesmo conchas eram mineradas para o desenvolvimento do país. Porém, durante esse tempo, diversas buscas e tentativas de encontrar metais foram realizadas, resultando em sequências de fracassos, uma vez que as quantidades e teores de metais encontrados eram baixos, associados a precariedade de técnicas e conhecimentos geológicos dos mineiros (FIGUEIRÔA, 2006; GERMANY, 2002).

Apenas dois séculos depois (1698) foram descobertos extensos depósitos aluvionares de ouro e diamante no estado de Minas Gerais. Entretanto, a exploração ainda era feita de forma rudimentar, sem muita técnica e com nenhuma preocupação ambiental. O ouro era concentrado em bateias e em água corrente dos rios, em granulações maiores. Já em menores granulometrias, eram empregados sucos de fruta como meio denso, bateias especiais (feitas de cobre) e concentração utilizando mercúrio (FIGUEIRÔA, 2006).

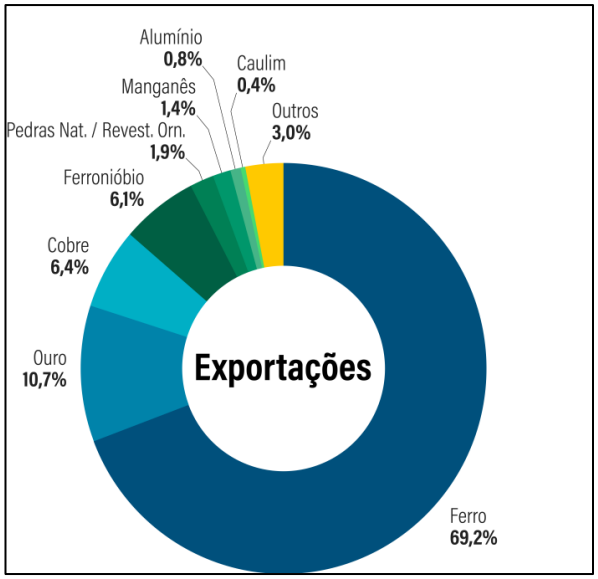
Seguindo o sucesso obtido em Minas Gerais, a pesquisa foi estimulada, obtendo resultados positivos nos estados da Bahia, Mato Grosso e Goiás. Porém a maior exploração ainda se concentrava em Minas Gerais, atingindo seu ápice por 40 anos (1739-1779), levando o Brasil a chegar a ter uma produção de ouro equivalente a 50% da produção mundial nos séculos XV a XVIII (FIGUEIRÔA, 1994, 2006).

A partir deste ponto a produção mineral sofreu altos e baixos até os dias atuais, nos quais representa 12,5% das exportações realizadas pelo país, gerando em média 195 mil empregos diretos. A contribuição para o PIB Brasil corresponde a 3,7% para a indústria extrativa, que inclui a produção de petróleo, gás natural e minérios, e 1,4% para a indústria extrativa mineral (IBRAM, 2019).

A produção nacional se divide em substâncias não metálicas, que representaram 20% da produção no ano de 2019, e substâncias metálicas. Dessa última, o ferro representa 72,8% da produção de concentrados principalmente nos estados de Minas Gerais e Pará. Em relação a exportação de commodities minerais, o ferro é responsável por 69,2% das realizadas, para a China, Estados Unidos, Países Baixos, Malásia e Canadá, principalmente. Além disso, as reservas brasileiras de ferro representam 19,2% das reservas mundiais, com um volume aproximado de 32,64 bilhões de toneladas, tornando o Brasil o segundo maior produtor de ferro do mundo com uma participação mundial de 18,9% (BRASIL, 2019a, 2020).

Além do ferro, o Brasil se destaca na reserva e produção de nióbio. O país possui a maior reserva de nióbio do mundo, tendo uma participação de 98,8% das reservas mundiais na forma de pirocloro, principalmente, concentrados nos estados de Minas Gerais e Goiás, com reservas menores nos estados do Amazonas e Rondônia. Em relação a produção, o país se mantém em primeiro lugar, com uma participação de 93,7% da produção mundial de nióbio equivalente a 80.670 toneladas de metal contido no ano de 2016. Tântalo, grafita natural, barita, níquel, terras raras também se destacam, levando o Brasil ao segundo lugar em relação as reservas mundiais desses minerais e em terceiro lugar na produção dos minérios vermiculita, alumínio, tântalo, crisotila, magnesita e grafita natural. A Figura 2 ilustra as principais exportações realizadas no segundo semestre de 2019 (ANM, 2019; BRASIL, 2019a).

Figura 2 - Sumário das principais exportações



Fonte: ANM (2019)

Os empreendimentos mineiros foram, ao longo da história do país, submetidos a diferentes regimes legais, que definiam, principalmente, a posse do subsolo e os impostos a serem pagos. Apenas na Constituição de 1988 foram estabelecidas medidas de proteção ambiental. Até então eram considerados desprezíveis os impactos oriundos da atividade mineira e, portanto, os resíduos eram descartados na natureza (BARBOSA, 1994; IBRAM, 2016).

Tais impactos se intensificaram na Revolução Industrial que além de aumentar a demanda de minérios, permitiram, a partir da criação das máquinas a vapor, o beneficiamento de minerais com baixos teores, aumentando assim a geração de resíduos. Em contrapartida, o descaso ambiental pela disposição dos rejeitos gerados continuou inalterado, sendo necessário depositar em locais mais distantes, devido ao aumento de volume. Assim, começam a ser construídas as primeiras barragens de rejeito, com a ajuda de equipamentos de lavra, em vales e encostas (IBRAM, 2016).

Contaminação de águas subterrâneas por elementos tóxicos como o arsênio e sulfetos, geração desenfreada de resíduos e disposição inadequada desses, degradação ambiental e conflitos com nativos são algumas heranças da mineração sem preocupação ambiental (ARAUJO; FERNANDES, 2016).

2.2- Pilhas de estéril e as consequências ambientais

As pilhas de estéril são estruturas fundamentais para o desenvolvimento de um processo de mineração à céu aberto, uma vez que para acessar o corpo de minério é necessário retirar e realocar o material estéril. Assim como as pilhas, as barragens de rejeito têm sua importância por dispor rejeitos de forma fácil e barata. Tais estruturas são consideradas uma das maiores estruturas criadas pelo homem na Terra, tanto em volume quanto em massa. Portanto, a construção dessas devem seguir um projeto bem definido, segundo os critérios de segurança e proteção ambiental definidos por norma, bem como atender as demandas da empresa de mineração (ARAGÃO, 2008; CETEM, 2010; HAWLEY, M. CUNNING, 2017).

O Ministério de Energia, Minas e Gás Natural da província de Colúmbia Britânica, no Canadá fez um levantamento dos incidentes relacionados a pilhas de estéril da região. Segundo este, entre os anos 1968 e 1991 foram registrados 73 acidentes e entre os anos 1992 e 2005, 122. Apesar do elevado número, nem todos os acidentes resultaram em falhas ou instabilidade

em grande escala, derramamento de detritos ou impactos ambientais adversos (HAWLEY, M. CUNNING, 2017).

Nos últimos anos o Brasil foi palco de acidentes envolvendo barragens de rejeito. Em 2015 a barragem de Fundão localizada na cidade de Mariana (MG), pertencente à mineradora Samarco, rompeu, liberando 34 milhões de m³ de lama sob o distrito de Bento Rodrigues (MG) e outros sete distritos de Mariana, além dos rios Doce, Gualaxo do Norte e do Carmo. Outro evento de rompimento ocorreu no ano de 2019 também no estado de Minas Gerias, na cidade de Brumadinho, no qual a Barragem I, pertencente mineradora Vale S.A., da mina Córrego do Feijão fez 300 vítimas, dentre elas mortes e desaparecimentos (FONSECA; ALEXANDRINO; FERREIRA, 2019; LOPES, 2016).

Além dos riscos de rompimento e as suas consequências, pilhas de estéril e barragens de rejeitos são grandes potenciais de riscos ambientais. Chaulya, Singh e Singh (1993) classificam tais impactos em sete categorias, sendo elas poluição de terras (pelo deslizamento de terra, degradação e erosão do solo), poluição de água (pela drenagem ácida da mina, poluentes tóxicos, mudança da hidrogeologia e sedimentação), poluição do ar (pela poeira, gases e fumaças), poluição sonora, poluição ecológica (pelo desflorestamento, danos a vida selvagem e aquática), poluição visual e mudanças sociológicas.

2.2.1- Legislação

Ao longo dos anos o Brasil desenvolveu a legislação e regulamentos de controle e fiscalização ambiental. Muitas delas foram modificadas e/ou acrescentadas à medida que a consciência ambiental foi se implantando no país. Atualmente a ANM, Agência Nacional de Mineração, antigo DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), órgão relacionado ao Ministério de Minas e Energia, é responsável pela fiscalização, regulamentação e outorga de atividades mineiras em território brasileiro, incluindo barragens de rejeito e pilhas de estéril. A Tabela 1 expõe um resumo do histórico das legislações brasileiras referentes à disposição e controle de barragens de rejeito e pilhas de estéril.

Tabela 1 - Histórico da legislação de barragens

Nomenclatura	Ano	Órgão	Descrição
Resolução CONAMA nº 237	1997	CONAMA	Implantação da apresentação do Licenciamento Ambiental, Licença Ambiental, Estudos Ambientais e Impacto Ambiental Regional para empreendimentos mineiros
Portaria DNPM n° 237	2001	DNPM	Primeira legislação específica para barragens de contenção de rejeitos no país
Norma brasileira – ABNT NBR 13.028/2006	2006	ABNT	Primeira versão da norma brasileira de barragens
Lei Nacional 12.334	2010	Governo Federal	Criação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)
Resolução CNRH n° 143	2012	CNRH	Definições dos critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume
Resolução CNRH n° 144	2012	CNRH	Definições das diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Segurança de Barragens
Portaria DNPM n° 416	2012	DNPM	Criação do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e disposição sobre Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração
Portaria DNPM n° 526	2013	DNPM	Regulamentação das obrigações determinadas pela PNSB aos empreendedores e aos órgãos fiscalizadores de barragens
Portaria DNPM n° 14	2016	DNPM	Estabelece prazo para apresentação de comprovante de entrega das cópias físicas do Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração (PAEBM)
Portaria DNPM n° 70.389	2017	DNPM	Criação do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
Norma brasileira – ABNT NBR 13.028/2017	2017	ABNT	Revisão da norma objetivando a adequação da norma brasileira às normas internacionais e a legislação vigente
Resolução ANM n° 4	2019	ANM	Criação de medidas reguladoras visando a redução de riscos de novos incidentes de rompimento de barragem e a prevenção de danos severos, assegurando a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido
Resolução nº 13	2019	ANM	Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração

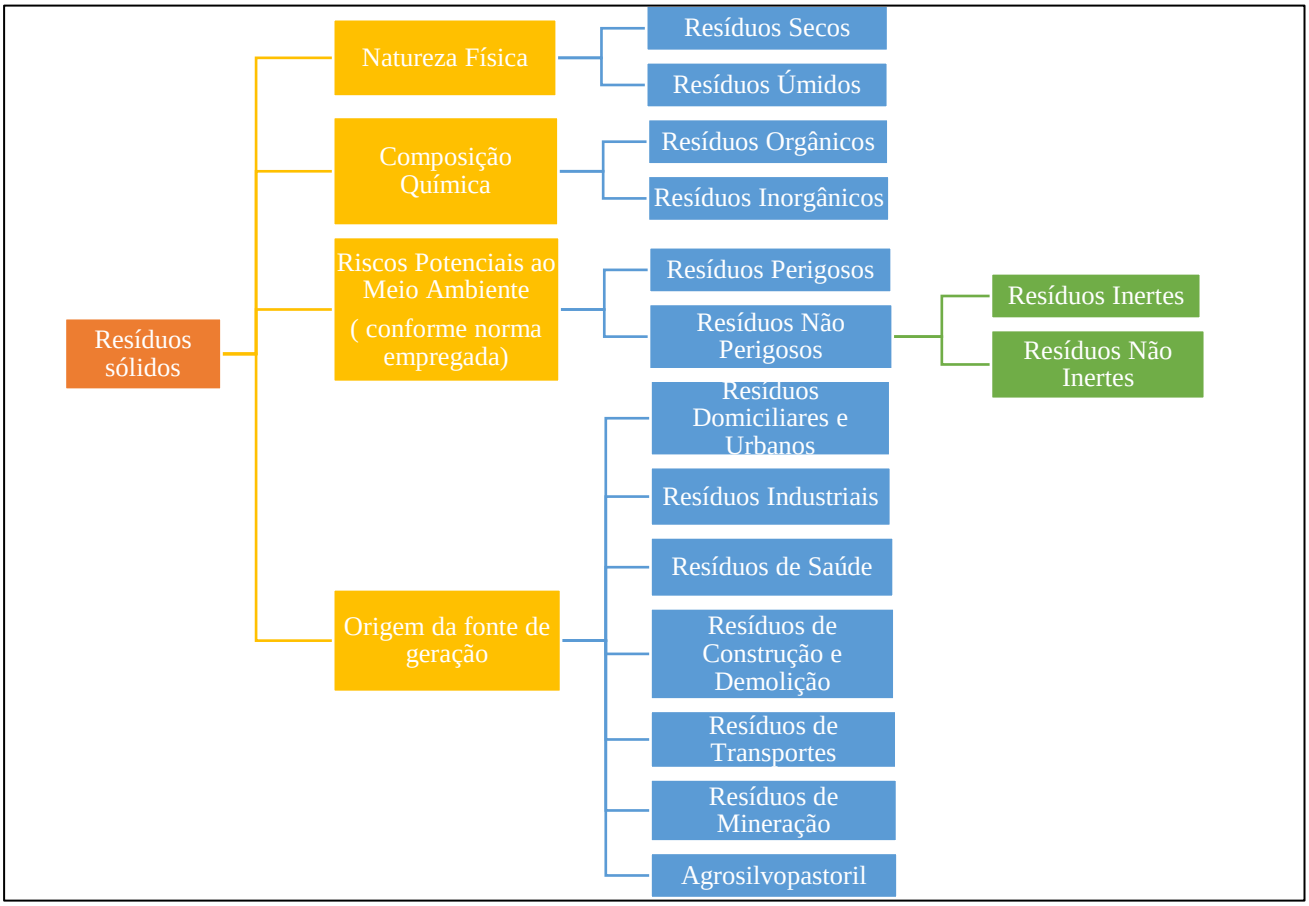
Fonte: Souza (2019)

Vale ressaltar também a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, em especial o artigo 3, que define que as atividades que resultam no manejo de sólidos devem se responsabilizar pelos resíduos sólidos e rejeitos gerados, buscando alternativas para minimizar sua quantidade, impactos ambientais e sociais (saúde humana). Portanto, não apenas adota critérios técnicos e normativos para disposição de estéreis e rejeitos objetivando a prevenção de riscos e impactos ambientais, como também incentiva a reutilização de tais materiais (BRASIL, 2010).

2.3- Os resíduos da mineração

É definido pela norma ABNT NBR 10004 como resíduo sólido todo material em estado sólido ou semissólido originário de atividades humanas, bem como atividades industriais, agrícolas, doméstica, hospitalar, de varrição, de serviços e comercial, bem como lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e líquidos impróprios para lançamento em rede pública de esgoto ou corpos de água. Podem ser classificados também quanto as suas características físicas, químicas, riscos potenciais ao meio ambiente e à origem, conforme a Figura 3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Figura 3 - Classificação dos resíduos sólidos



Fonte: Adaptado de Santos (2018).

A geração de resíduos no processo de mineração é inevitável e os resíduos são classificados em três principais tipos. São eles os estéreis, rejeitos e resíduos de outra natureza. Os estéreis são resultado do decapeamento da mina e da lavra do minério. É definido rejeito o material resultante da etapa de beneficiamento mineral. Efluentes do tratamento de esgoto, resíduos da construção civil, carcaças de baterias, pneus utilizados pela frota de veículos, resíduos de papel/papelão/plástico/vidro são exemplos de materiais que entram na classe de resíduos de outra natureza. Em relação a geração de resíduos, estima-se que, apenas no ano de 2018 foram gerados um em média 562 milhões de toneladas de resíduos no estado de Minas Gerais, sendo 51,55% classificados como rejeito, 48,41% estéril e 0,04% resíduos de outra natureza (FEAM, 2018).

A geração de resíduos é ainda maior quando pensamos em minérios cujo teor é extremamente baixo, como o caso de ouro e cobre. Em média, minerais que contém cobre são beneficiados com um teor médio de 1 a 2%, podendo, em alguns casos, ser economicamente viável o beneficiamento de teores de até 0,4%. Só no ano de 2019, o Brasil produziu em média 101 milhões de toneladas de rejeito oriundo do beneficiamento de cobre (BRASIL, 2020; DAVENPORT, 2013).

Apesar disso, a contabilização dos resíduos gerados nem sempre é realizada e a obtenção dos dados é, muitas vezes, de difícil acesso. Por isso, são realizadas previsões. Em 1996, a International Commission on Large Dams (ICOLD) previu, com baixo nível de confiabilidade, que a geração de resíduos de mineração mundial excedia 5 bilhões de toneladas anualmente. Essa previsão é, segundo Blight (2011), falha. Segundo o mesmo, apenas no ano de 1995 as minas de ferro, cobre, ouro, chumbo e alumínio juntas geraram 35 bilhões de toneladas de resíduos.

Dentre as formas de disposição destes resíduos, cita-se: a disposição subaquática, que consiste na deposição de materiais com granulometria muito fina embaixo da água; disposição em superfície, que consiste em descartar o material em praias secando ao ar livre; e disposição em pilhas e barragens, que é o método mais empregado e que consiste na construção de estruturas utilizando o próprio resíduo. Teor de água, presença de metais pesados, pluviosidade do local de depósito, forma e tipo de descarte, método de construção, dentre outras variáveis, devem ser muito bem escolhidas e monitoradas a fim de garantir a segurança da estrutura (IPEA, 2012).

A FEAM (2018) fez um levantamento da destinação dos resíduos no estado de Minas Gerais. Segundo os dados, apenas 0,07% dos estéreis gerados possuem uma destinação externa. Deste valor, 90,51% é direcionado para recuperação de voçoroca, 5,04% para incorporação em solo agrícola, 4,45% para disposição em bota fora e apenas 0,003% para a reutilização. Em contrapartida, 99,93% do estéril é disposto internamente na mina, sendo as pilhas de estéril responsáveis por absorver 72,43% do material, os depósitos com 20,08%, bota fora 3,02%, recobrimento de área lavrada 1,13% e barragem 0,31%.

Já em relação a rejeitos, 0,001% são classificados como rejeitos sem destino definido, o que corresponde a 3,87 mil toneladas de material; 0,003% possuem destinação externa a mina, o que representa aproximadamente 10 mil toneladas. Deste valor, 59,25% são destinados a

reutilização, 20,04% para bota-fora, 19,93% para doação e 0,78% para venda. Já aqueles destinados para dentro da mineração correspondem a 99,995%. Desses 94,58% são armazenados em barragens, 2,87% em pilhas, 0,72% bota fora e 0,66% em depósito de estéreis (FEAM, 2018).

Além da geração de resíduos, a mineração ainda lida com outras grandes questões ambientais de forma direta ou indireta como a poluição visual, geração de poeira e ruídos, poluição de águas, gastos energéticos, dentre outros. Estima-se que na produção de cobre, o gasto energético represente 35% do valor de venda do metal. Além de ser responsável pelo aumento do custo de produção, o uso de combustíveis fósseis para a geração de energia está associado a impactos ambientais tais como o efeito estufa e o aquecimento global, uma vez que tal prática é responsável por uma grande geração e emissão de dióxido de carbono (CO_2), principal gás de efeito estufa. Apesar de menos expressivas, estudos apontam que as hidrelétricas, fontes energéticas "limpas" e mais utilizadas no Brasil, também são responsáveis pela geração de gases do efeito estufa tais como CO_2 e CH_4, pela decomposição de matéria orgânica presentes nos reservatórios (GOLDEMBERG; LUCON, 2007; SCHUCHTER, 2010; WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Já os outros impactos devem ser previamente incluídos nos relatórios de impacto ambiental necessários para a concessão de lavra, tais como EIA (Estudo de Impacto Ambiental) e RIMA (Relatório de Impacto Ambiental). Neles, além de expor os problemas, devem ser criadas e apresentadas soluções e alternativas para reduzir ou minimizar as consequências a partir de medidas mitigadoras preventivas, mitigadoras corretivas, mitigadoras compensatórias e potencializadoras, conforme o grau de impacto (SILVA; ANDRADE, 2017).

2.4- Técnicas de reaproveitamento de resíduos

A partir do momento que a intervenção humana no meio ambiente, bem como a geração e depósito de resíduos de todas as naturezas passaram a trazer danos ao bem-estar da sociedade, é observada a crescente preocupação e conscientização ambiental pela população. Essa, portanto, através de órgãos internacionais de preservação ambiental como o Greenpeace e a Organização das Nações Unidas (ONU) vem exigindo de governos posições e medidas de proteção à natureza, bem como incentivando a inclusão de práticas sustentáveis no dia a dia da

sociedade e das empresas. Portanto, surgem algumas práticas de conservação ambiental que serão discutidas nos próximos tópicos (TREVISAN et al., 2016).

2.4.1- Reciclagem e Reutilização

A reciclagem consiste em técnicas que objetivam a reinserção e aproveitamento de detritos e rejeitos na cadeia de produção. Tal prática vem sendo amplamente estudada e aplicada em todo o mundo, sendo considerada extremamente vantajosa especialmente em países desenvolvidos. No Brasil, a reciclagem ainda é pouco aplicada, apesar de várias pesquisas. Isso se dá pela precariedade da fiscalização nas etapas de manejo e depósitos de resíduos. Portanto, a técnica consiste em transformar o resíduo em um novo produto, pela inserção em um novo ciclo de produção (MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002).

Já a reutilização, apesar de muitas vezes ser confundida com a reciclagem, se distingue por buscar aproveitar o material ao máximo, através da reaplicação do mesmo em seu processo originário ou de outra forma, a fim de reduzir o desperdício. Isso, portanto, não significa que o resíduo será utilizado para gerar um outro produto. Santos (2010) estudou a reutilização de um rejeito de mineração. Sua proposta consistiu em submeter a lama (rejeito ultrafino) a um novo processo de flotação em coluna (SANTOS, 2010; SANTOS, 2018)

2.4.2- Ecologia Industrial

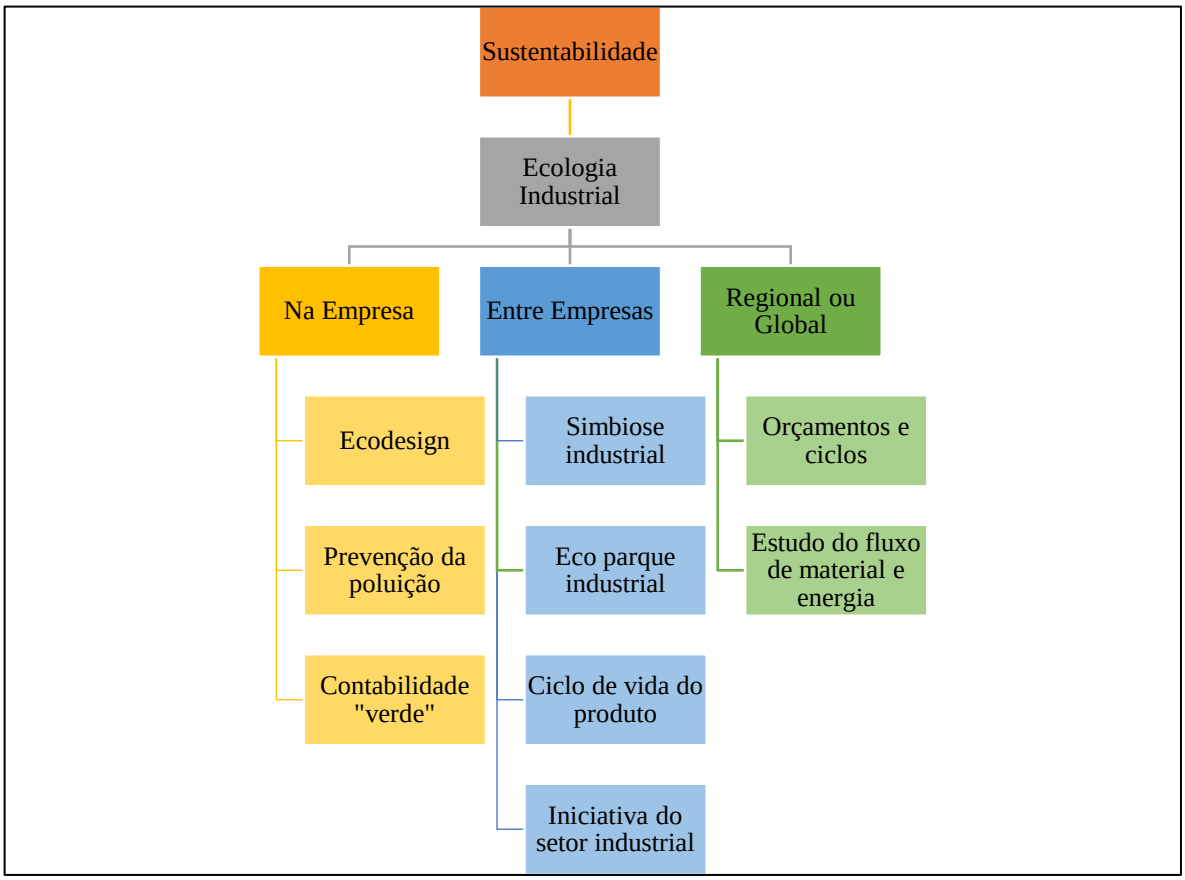
Estima-se que o termo “ecologia” tenha sido utilizado pela primeira vez em 1869 pelo alemão Ernst Haeckel. O termo origina-se do grego e significa, em tradução literal, estudo da casa. Neste sentido, casa se refere ao ambiente em que se vive e a ciência dedica-se ao estudo das relações entre os seres vivos e o ambiente por eles habitados. Embasado no conceito por Haeckel, surge o termo Ecologia Industrial que se baseia na comparação entre os ecossistemas naturais e industriais, objetivando a integração daquilo que é artificial e produzido pelo homem da lógica dos sistemas naturais (MOTTA; CARIJÓ, 2013).

Visto isso, a Ecologia Industrial traz uma perspectiva diferente em relação a produção ambientalmente consciente. O conceito propõe uma cooperação entre indústrias e setores de uma mesma indústria e, a partir dela, realizar a troca de informações, permitindo com que o consumo de energia e de materiais sejam otimizados, além de possibilitar que um resíduo de um processo se transforme em matéria prima de outro processo e assim reduzir a necessidade de extração de matérias-primas. De forma gráfica, pode-se dizer que a Ecologia Industrial objetiva tornar o ciclo de utilização dos materiais, que consiste em um sistema linear e aberto, em um ciclo fechado, inspirado em processos que ocorrem na natureza. Com isso, a Ecologia Industrial reduz impactos ambientais por diminuir ou, em alguns casos, extinguir a geração de resíduos, bem como sua disposição no meio ambiente (BAAS, 2005; BRANCO; MAÑAS, 2009; TREVISAN et al., 2016).

Além das vantagens ambientais, a técnica também se apresenta vantajosa em questões sociais e econômicas. Por transformar um resíduo em subproduto comercializável, adoção de medidas que reduzem custos de matérias-primas, redução de custos com depósito e movimentação de resíduos são exemplos de ganhos econômicos. Já dentro de ganhos sociais destaca-se a melhoria da qualidade de vida populacional (TREVISAN et al., 2016).

Até então foi discutido a atuação da Ecologia Industrial entre empresas, porém ela também ocorre internamente na indústria e em escala regional e global. Dentro da própria empresa, a Ecologia Industrial se faz presente no ecodesign, na prevenção da poluição e na adoção de uma contabilidade “verde”. Já a atuação entre empresas é feita pela simbiose industrial, pela análise do ciclo de vida do produto e por iniciativas dos setores industriais. Por fim, a atuação regional ou global inclui planejamentos de orçamentos e ciclos de desenvolvimento e estudo do fluxo de material e energia. A Figura 4 esquematiza as áreas de atuação da Ecologia Industrial (CHERTOW, 2000).

Figura 4 - Áreas de operação da Ecologia Industrial



Fonte: Adaptado de Chertow (2000)

2.4.3- Simbiose Industrial

Simbiose é uma ação fundamentada pela Ecologia Industrial e se baseia nos relacionamentos simbióticos da biologia. Vale ressaltar que, na natureza, há três diferentes formas de relação simbiótica, sendo elas o mutualismo, comensalismo e parasitismo. Excluindo o parasitismo, as outras relações se baseiam na troca e na relação mútua entre os organismos objetivando o beneficiamento de ambas as partes na ligação. Portanto, a Simbiose Industrial faz uma analogia ao que ocorre na natureza e aplica nas relações industriais. Assim, o conceito objetiva a mútua cooperação entre duas ou mais firmas, a partir da troca de materiais, informações e serviços e assim reduzir o descarte de resíduos com a reinserção dos mesmos na cadeia produtiva (BRANCO; MAÑAS, 2009; MOTTA; CARIJÓ, 2013).

2.4.4- Coprocessamento

A técnica conhecida como coprocessamento consiste no aproveitamento de resíduos em larga escala partindo do princípio da incineração de material. Utilizado principalmente pela indústria cimenteira, o resíduo é utilizado como combustível em fornos para a produção de clínquer e/ou como matérias-primas, incorporado ao clínquer a fim de melhorar a qualidade do produto (ROCHA; LINS; SANTO, 2011).

A produção do clínquer consiste na calcinação e fusão dos materiais constituintes em fornos rotativos, a uma temperatura de 1.450ºC. O calcário é o principal constituinte (94%), mas o clínquer ainda se constitui por argilas (4%) e óxidos de ferro e alumínio (2%). O processo ainda é responsável pela liberação de CO_2 pela decomposição do calcário, além de utilizar combustíveis fósseis não renováveis (ROCHA; LINS; SANTO, 2011).

O processo de incineração de resíduos é usado pelo homem desde os tempos mais remotos. Acreditava-se que o fogo era purificante, portanto, em Jerusalém o lixo municipal era queimado na periferia da cidade. Esse processo, porém, é responsável pela emissão de diversos gases poluentes e de efeito estufa. E assim a prática perde o sentido sagrado e passa a ser controlada e regulamentada, bem como incentivadas novas tecnologias (MARINGOLO, 2001).

Dentre as vantagens de se aplicar o coprocessamento cita-se a redução de custos de destinação e destruição de resíduos, bem como os impactos ambientais associados aos mesmos; redução da utilização de combustíveis convencionais e assim diminuição de emissão de gases do efeito estufa; preservação de fontes energéticas não renováveis; preservação das jazidas. Em questões sociais é vantajoso por não afetar a saúde da população, bem como melhorar a qualidade de vida pela redução de gases do efeito estufa (CEMBUREAU, 2009).

Estima-se que em 2017, existiam 38 plantas atuando com o método de coprocessamento no Brasil, com um ou mais fornos licenciados, atingindo 1.172 toneladas de resíduos coprocessados. Em relação a forma de utilização dos resíduos, calcula-se que 10% dos resíduos foram aplicados como matéria prima alternativa e 90% como combustíveis alternativos, sendo destes 17% combustíveis de biomassa e 73% combustíveis alternativos, que inclui pneus, blend (mistura) e outros (serragem impregnada com óleo, solos contaminados e solventes). Dentre as matérias-primas alternativas têm-se que 50% são materiais orgânicos de origem agrícola, 16% são cavacos de madeira não impregnada e 4% lama de tratamento de esgoto (ABCP, 2019).

2.5- Aplicações industriais de resíduos da mineração

A sustentabilidade ambiental é um termo que vem sendo inserido na indústria mineira nas últimas décadas e consiste em um conjunto de ações que visam minimizar os impactos gerados pela produção no meio ambiente e ainda reduzir os custos com a preservação e conservação ambiental. Tais ações estão associadas ao crescente descarte inadequado de materiais, que resultam em um alto desgaste ambiental e riscos à saúde pública, redução de custos tanto com questões ambientais (licitações e controle ambiental) quanto com a estocagem e transporte do material, e esgotamento das reservas (GOLUB; SILVA, 2017; MOTA et al., 2017; SANT'ANA FILHO, 2013; SILVA; ANDRADE, 2017; SILVEIRA, 2015).

Quando se pensa em rejeitos e estéreis de mineração logo associa-se a barragens e pilhas. Tais métodos de disposição de material foram, por muito tempo, amplamente utilizados e considerados a principal forma de estocagem de resíduos da mineração. Porém apresentam elevado potencial de risco. Como exemplo, podem ser citados os acidentes envolvendo barragens de rejeitos ocorridos no Brasil nos últimos anos nas cidades de Mariana (MG) e Brumadinho (MG) (FONSECA; ALEXANDRINO; FERREIRA, 2019; LOPES, 2016).

Tendo em vista o grande volume de resíduos gerados pela atividade mineira e sua inevitabilidade, bem como um crescimento da responsabilidade social unida à sustentabilidade ambiental, diversos setores da indústria vêm inserindo os rejeitos de mineração em sua cadeia produtiva. Portanto, além dos ganhos ambientais, a inserção de uma nova aplicação para tais materiais resulta em consequências indiretas como ganhos sociais pela geração de empregos e pelo crescimento econômico (SANT'ANA FILHO, 2013).

Independente da aplicação, as características do material devem ser muito bem levantadas através da caracterização do material, para que assim possam ser definas suas potenciais aplicabilidades. Dentre as técnicas de caracterização destacam-se a caracterização física, química-geoquímica, mineralógica e geotécnicas. Vale ressaltar que as características de um mesmo material podem variar conforme a gênese e processos geológicos pelos quais foram submetidos. Portanto, o estudo deve ser realizado com cautela e de forma metodológica (SANTOS, 2018).

Dentre os materiais, o estudo do rejeito de ferro vem ganhando muita atenção principalmente devido aos acidentes anteriormente citados e a pressão da população e dos órgãos fiscalizadores para a redução da estocagem de material em barragens, bem como por ser o minério mais abundante e extraído mundialmente. A Tabela 2 revisa a literatura a respeito de recentes estudos envolvendo o aproveitamento de rejeito da mineração de ferro em diferentes indústrias.

Tabela 2 - Estudos de aplicação de rejeito de ferro

Aplicação	Empresa	Referência
Substituição de areia artificial em filtro de barragem	Empresas não divulgadas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais	Echeverri (2012)
Aplicação como material de construção civil	Vale no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais	Andrade (2014)
Incorporação na camada de base de pavimentos de rodovias	Empresa não divulgada do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais	Bastos (2013)
Incorporação ao cimento para utilização em camadas de base e sub-base de rodovias	Mina Qidashan em Anshan, China	Xu (2013)
Produção de elementos de concreto para pavimentação	Empresa não divulgada na região metropolitana de Belo Horizonte	Toffolo *et al*. (2014)
Utilização em camadas de base e sub-base de rodovias	Grupo de mineração Mhag Serviços e Mineração S/A e Mineração em Jucurutu, Rio Grande do Norte	Dantas (2015)
Substituto de agregados finos e grossos de blocos intertravados de concreto (*Pavers*) e obtenção de cerâmica com adição dos rejeitos na proporção de 0% e 5% em substituição à argila	Bamin Mineração	Silva (2014)
Aplicação do rejeito para a produção de areia industrial para fabricação de artefatos de cimento para uso na construção civil.	MINERITA (Minérios Itaúna Ltda.) em Itaúna, Minas Gerais	Silveira (2015)
Aproveitamento do rejeito de sinter-feed como agregado na produção de concreto para a fabricação de elementos pré-moldados.	Empresa não identificada em Sarzedo, Minas Gerais	Costa; Gumieri; Brandão (2014)
Aproveitamento de rejeito de minério de ferro para fabricação de tijolos cerâmicos	Pedreira Um Valemix em Catas Altas, Minas Gerais	Severo (2019)

Fonte: Próprio autor

2.5.1- Filito e suas Aplicações Industriais

A mineração produz todos os anos milhares de toneladas de concentrados. Ao que diz respeito ao filito, a produção, quando comparada a outros minérios, é baixa, porém, ainda assim, significativa. Apenas no ano de 2016 o minério foi responsável por movimentar um total de 13,39 milhões de reais no estado de Minas Gerais. Foram produzidas 222 mil toneladas de minério bruto, ou seja, vindos direto da mina sem qualquer alteração física e/ou química e aproximadamente 57 mil toneladas de minério beneficiado, ou seja, submetido a algum processo de alteração física e/ou química (BRASIL, 2019b).

Quanto a gênese do minério, é classificado como uma rocha metamórfica formada a partir de metamorfismo regional de baixo grau em rochas pelíticas e se encontra entre o xisto e a ardósia em uma escala de grau metamórfico, tendo a última como protólito. Apresenta granulação fina, brilho sedoso e foliação específica, denominada foliação filítica, que confere ao material uma maior fragilidade (MORAIS, 2018).

Em relação a composição mineralógica, os filitos são constituídos por quartzo, micas (muscovita, sericita, ilita), caulinita, pirofilita, clorita e feldspato em composições diferentes conforme sua gênese. Podem também apresentar minerais acessórios tais como o zircão, magnetita, hematita, ilmenita, rutilo, turmalina, grafita, pirita, epidoto, albita e cloritoide (LEMOS, 2011; RIBEIRO et al., 2000).

Devido sua abundância, o filito vem sendo bastante estudado como material alternativo, principalmente na constituição de cimentos, cerâmicas e na construção civil em geral. Estima-se que no ano de 2014, o estado de São Paulo possuía uma reserva lavrável de filito de aproximadamente 120 milhões de toneladas e o estado de Minas Gerais, no mesmo ano, uma reserva lavrável em torno de 63 milhões de toneladas. A produção ROM (run of mine) em ambos estados no ano de 2014 foi equivalente a 141 mil toneladas, enquanto a produção beneficiada foi de cerca de um milhão de toneladas, gerando um capital aproximado de 42 milhões de reais (DNPM, 2016, 2017).

Atualmente, a indústria que mais absorve o minério filítico é a indústria da construção civil. Por ser composto basicamente por sílica e alumínio, o filito é, segundo Melo e

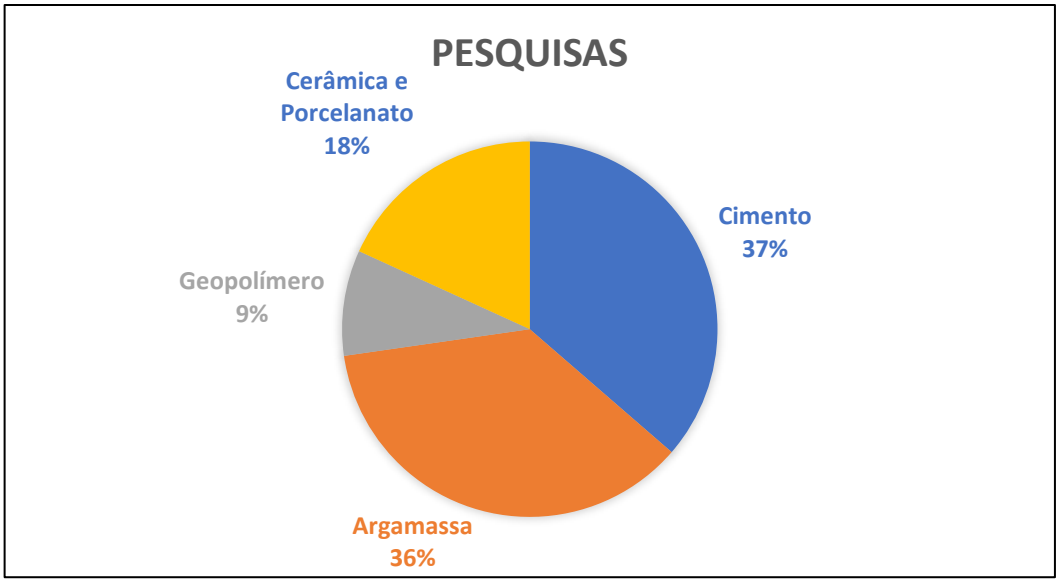
Thaumaturgo (2012), um material eficiente na composição de cimento geopolimérico na substituição de cimento Portland em aplicações estruturais, por ser fonte de aluminossilicato, elemento essencial para a geopolimerização. Outra característica para a aplicação de filito em geopolímeros é a presença de minerais de caulinita e caulin (MELO et al., 2017).

Além da aplicação em geopolímeros, Moreto (2006) categoriza a aplicação do material de acordo com a cor do mesmo. Por ser um produto de menor valor comercial, o material de cores claras, como creme e creme esverdeado, pode ser aplicado em massas de cerâmica branca como substituto parcial das argilas brancas, caulins e feldspatos. Nesta substituição, o filito adquire função de fundente durante a queima. O material de colocação rosa apresenta um maior leque de aplicações, sendo elas em argamassa, em ração animal e em fillers na indústria de tintas e selantes e, ao contrário do material branco, não é submetido à queima. Para sua comercialização, o material passa pelas etapas de beneficiamento como moagem e homogeneização e em seguida é ensacado e comercializado. Ao contrário do material de coloração rosa, o material cinza escuro apresenta pouca aplicação e venda mais dificultada, por isso suas partes mais claras são homogeneizadas com o material rosado para então ser comercializado.

Por apresentar baixa permeabilidade, o filito ainda é apontado como um bom constituinte de materiais a prova d’água e de concretos especiais. Outro fator positivo é o preço associado ao minério. Por ser bastante abundante no Brasil, o filito apresenta valor econômico agregado baixo, se tornando um material atrativo como substituinte ou aditivo, para a redução de custos e trazendo benefícios na integração de diferentes materiais (MELO et al., 2017).

Através da análise da revisão bibliográfica, observa-se que as pesquisas voltadas para desenvolvimento de produtos a partir da aplicação de filitos, concentram-se na indústria de construção civil, sendo as aplicações em cimento Portland e em argamassas as mais empregadas. A Figura 5 ilustra as principais áreas de estudo. Para isso foi utilizada a plataforma Google Scholar para pesquisa, atentando a artigos escritos após ao ano de 2000.

Figura 5 – Pesquisas de aplicação de filito



Fonte: Próprio autor

2.6- Argamassa

Com a evolução, o homem começou a demandar materiais de construção, uma vez que aqueles que estavam à sua disponibilidade como madeiras, barro, terra e pedras já não estavam atendendo à sua demanda. Acredita-se que os Romanos foram os primeiros a utilizar o cimento composto por cal, areia, pedra partida e materiais pozolânicos para suas construções. Porém, estudos apontam que a argamassa constituída apenas por cal na forma de areia natural já era utilizada em meados de 2980 a.C. na construção de grandes pirâmides (RECENA, 2012; SANTIAGO, 2007).

As argamassas, porém, sofreram muitas modificações em sua composição ao longo do tempo. Inicialmente era composta apenas por areia e cal, podendo ser incorporados alguns materiais aditivos como borra de ferro, pó de tijolo, *massapez* (pozolanas de origem portuguesa), cinza de carvão. Porém, apenas no século XIX o cimento que conhecemos hoje (constituído por calcário e argila, basicamente) foi desenvolvido e assim integrado nas

argamassas como material aglomerante (DA SILVA, 2006; RECENA, 2012; SANTIAGO, 2007).

A norma ABNT NBR 11172:1990 define aglomerantes como materiais geralmente pulverizados, que ao serem misturados com água, são capazes de aglomerar e fixar materiais entre si, endurecendo por secagem ou devido a reação química. Dentre os materiais aglomerantes mais utilizados na construção civil destaca-se a cal e o cimento Portland. Ambos são classificados com aglomerantes quimicamente ativos, uma vez que seu endurecimento se dá a partir de uma reação química. Juntos, representam os materiais mais utilizados no assentamento de elementos de alvenaria e em revestimento, na constituição de argamassas mistas de cimento e cal. Tal importância se deve pela geração de uma argamassa com propriedades intermediárias àquelas compostas apenas por cal e apenas por cimento, variando de acordo com a proporção entre cal e cimento Portland (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990, 1995).

A cal é um material resultante da calcinação de rochas calcárias, constituída basicamente por $CaCO_3$, à uma temperatura de aproximadamente 900ºC, originando CaO e CO_2. O óxido de cálcio (CaO), denominado de cal viva, se torna um material aglomerante ao entrar com contato com a água, resultando em $Ca(OH)_2$. O processo de hidratação é conhecido como extinção da cal. O material é amplamente utilizado na composição de argamassas por proporcionar melhorias, como aumento da trabalhabilidade, da retenção de água, da aderência e redução da retração (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007)

O cimento Portland é uma mistura essencialmente de cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), podendo apresentar adições de magnésia (MgO), anidrito sulfúrico (SO_3), dentre outros. Tal mistura é pulverizada, homogeneizada e submetida a um processo de queima a uma temperatura aproximada de 1400ºC resultando no *clincker*, que ao ser pulverizado origina no cimento Portland (BAUER, 2019)

O processo de calcinação resulta em alteração químicas e físicas no material, formando diferentes compostos tais como o silicato tricálcico ($3CaO\text{-}SiO_2$), silicato bicálcico ($2CaO\text{-}SiO_2$), principais constituintes. A concentração de cada composto dá ao cimento determinadas propriedades. O silicato tricálcico é responsável pela resistência em todas as idades, enquanto o silicato bicálcico fornece ao cimento aumento da resistência em idades mais avançadas. De

forma geral, em argamassas o cimento Portland é responsável pelo tempo de cura e resistência mecânica final (BAUER, 2019).

Além do material aglomerante, que pode ser um ou mais, as argamassas de revestimento são constituídas por agregado miúdo e água, bem como aditivos que podem ser adicionados à mistura a fim de melhorar algumas propriedades, como aderência e endurecimento, conforme descritos na norma ABNT NBR 13281:2005. Os aditivos mais amplamente utilizados são os incorporadores de ar e aditivos minerais como argilas, xistos, caulim (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005; RECENA, 2012).

Agregado miúdo é, segundo a ABNT NBR 7211:2019, um material denominado areia, que pode ter origem natural, ou ser resultante do processo de britagem, ou ainda, uma combinação de ambos, de granulometria intermediária a 4,8mm (4#) e 0,075mm (200#). Além disso, o agregado deve apresentar baixíssima atividade química e ainda pode ser classificado segundo a origem e o peso específico aparente. Apesar das areias serem geralmente constituídas por sílica, a composição química destas pode variar, de acordo com a disponibilidade e preço, atentando à presença de impurezas, reatividade do material e quantidade de material pulverulento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019; CARASEK, 2010)

A água na argamassa tem papel fundamental, principalmente na função de ativação do material aglomerante. Algumas propriedades são diretamente afetadas com a variação do teor de água, podendo tornar a massa inutilizável caso colocada em excesso ou em escassez. A retração e a trabalhabilidade são os fatores mais afetados pela relação água/material seco. Tais propriedades influenciam diretamente em características muito importantes nas argamassas, como a aderência e a resistência (CARASEK, 2010; MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

Outro fator que deve ser levado em consideração é a qualidade da água utilizada no amassamento. A norma ABNT NBR 15900:2009 descreve os requisitos necessários para classificar a água como adequada ou não para a implementação em concretos. Em relação a origem, apenas a água oriunda de abastecimento público é considerada adequada e, portanto, não requer ensaio de qualidade. Águas de origem como fontes subterrâneas, captação fluvial, salobra, entre outras devem ter as propriedades químicas como a concentração de sulfetos, cloretos, álcalis e outros contaminantes analisadas, bem como realizada uma análise preliminar (cor, odor, presença de gordura e óleos, material sólido, material orgânico e ácidos) e uma

análise do tempo de pega e resistência à compressão de argamassas compostas por águas com tais origens (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a)

As argamassas são classificadas de diversas maneiras de acordo com sua composição, aplicação e propriedades. Portanto, argamassa de revestimento, conforme definida na ABNT NBR 13529:1995, são utilizadas no cobrimento de uma superfície possibilitando o recebimento do acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final. Já a argamassa mista é aquela composta por mais de um aglomerante (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

2.6.1- Materiais Alternativos na Construção Civil

Estima-se que entre os anos 2003 e 2014, o Brasil tinha atingido altos valores de produção e consumo de cimento, chegando a 72 milhões de toneladas de cimento consumidos no ano de 2014. Isso se deveu ao grande crescimento da renda e do emprego, expansão do crédito imobiliário, queda da taxa de juros e inflação, e investimento em programas de infraestrutura. Em contrapartida, a partir de 2015 o país entrou em um decréscimo de produção e consumo, devido à crise política-econômica. Mesmo assim, em 2016 o país atingiu as marcas de sexto maior produtor e oitavo maior consumidor de cimento no mundo, com uma taxa de consumo per capita igual a 260 kg por habitante. Já em 2019 o consumo teve um aumento de 3,42% em relação ao ano anterior, totalizando 54,53 milhões de toneladas de cimento (CBIC, 2021; VISEDO; PECCHIO, 2019).

Sabe-se que o processo de calcinação da cal e de produção do clínquer corroboram para o desenvolvimento de problemas ambientais associados a esses processos. Cerca de 12 a 15% do total energético gasto pela indústria é consumido na produção de cimento, sendo esta originária da queima de combustíveis fósseis. Além disso, estima-se que o processo de produção do cimento seja responsável pela emissão de 7% da emissão mundial de CO_2, gás contribuinte para o efeito estufa (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011).

Cabe então a indústria da construção civil buscar novas tecnologias a fim de minimizar tais problemas. Para isso, muitas alternativas foram propostas. Dentre elas, cita-se a ACM00003, que se trata de uma metodologia desenvolvida pela Convenção-Quadro das

Nações Unidas sobre a Mudança do Clima que objetiva a substituição de combustíveis fósseis na produção de clínquer e cal (UNFCCC, 2020).

Outra proposta foi apresentada por Mehta e Meryman (2009). Elas propuseram três ferramentas para a redução do consumo de cimento e consequentemente na redução da emissão de dióxido de carbono. São elas: consumir menos concreto em novas estruturas, consumir menos cimento para fazer misturas de concreto e consumir menos clínquer em materiais cimentícios. Para cada ferramenta são apontadas soluções tais como desenvolvimento de conceitos arquitetônicos inovadores e *designs* estruturais para minimizar o consumo de concreto, otimizar o tamanho e a classificação dos agregados para reduzir o volume total da pasta de cimento em misturas de concreto, selecionar misturas de cimento Portland e misturas de concreto que contenham alto volume de um ou mais material cimentício complementar, tais como cinza de carvão, escória de alto forno granulado, naturais ou calcinadas, sílica ativa e cinza de casca de arroz, dentre outros.

Quanto a última solução, diversos estudos vêm sendo conduzidos a fim de aplicar esses e outros materiais na composição de cimentos, como substituintes de cal e na integração de argamassas. Em especial, destaca-se os estudos de aplicação de resíduos de mineração na construção civil (ARCE; GARZÓN; SÁNCHEZ-SOTO, 2019; BASTOS, 2013; FONTES, 2013; MELO; THAUMATURGO, 2012; MORAIS, 2018; SILVEIRA, 2015).

Apesar da vasta quantidade de estudos e da necessidade do tema, ainda é necessário que haja uma maior divulgação do assunto, conhecimentos técnicos e estudos em meio a comunidade trabalhadora e científica a fim de melhor consolidar as técnicas, bem como realizar alterações nas normas e referências de construção (OLIVEIRA, 2015).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e as metodologias para a preparação das amostras, as execuções dos ensaios de caracterização do filito e constituintes da argamassa, e ensaios de aplicação de filito em argamassa.

Os ensaios de caracterização do filito incluem a determinação da densidade de cada faixa granulométrica pelo teste de picnometria e massa unitária. Para os constituintes da argamassa, os testes incluem a determinação da massa específica do cimento segundo ABNT NBR 16605:2017 e massa específica do agregado miúdo segundo ABNT NBR NM 52:2002, densidade da cal pelo método de picnometria e massa unitária do cimento, agregado miúdo e da cal (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b, 2017).

Dentre os ensaios de aplicação de filito em argamassa incluem-se os testes de resistência à compressão uniaxial, permeabilidade de água, densidade no estado fresco, densidade no estado endurecido, retenção de água, aplicação da massa em parede chapiscada e permeabilidade em parede chapiscada.

3.1- Materiais

A formação que engloba o material em estudo está localizada na zona rural do município de Santa Rosa da Serra – MG, delimitado pelas coordenadas 19º35’54” de latitude sul e 46º03’33” de longitude oeste, e é gerido e estocado pela empresa Mineração Dornas – D’Brical. O empreendimento é responsável pelo beneficiamento de calcário para aplicações, principalmente, como brita para construção civil. A Figura 6 apresenta a evolução do empreendimento mineiro, sendo à esquerda uma foto de satélite do local em 2016, e à direita, uma foto em 2019. Nota-se nas imagens o avanço da frente de lavra e a evolução de áreas de depósito de minérios e estéril.

Figura 6 – Imagens aéreas do empreendimento mineiro em 2016 (à esquerda) e em 2019 (à direita)

Fonte: Google Earth

Quanto a formação geológica do local, a mina está localizada no Cráton do São Francisco, cujas rochas integram o Grupo Bambuí, que se estende pelos estados de Minas Gerias, Goiás e Bahia e se caracteriza pela presença de deposições carbonáticas datadas do Neoproterozóico. Tal formação é dividida em unidades conforme a litoestratigrafia, sendo a mina integrante da Formação Sete Lagoas. Essa formação se caracteriza pela presença de dolomitos, calcários e pelitos (VIEIRA, 2008).

Em relação às características do carbonato da mina, pode se dizer que é descrito como resistente, com presença de xistosidades e fraturas em várias direções. Nota-se também a presença de veios de calcita ligeiramente concordantes com a estratificação.

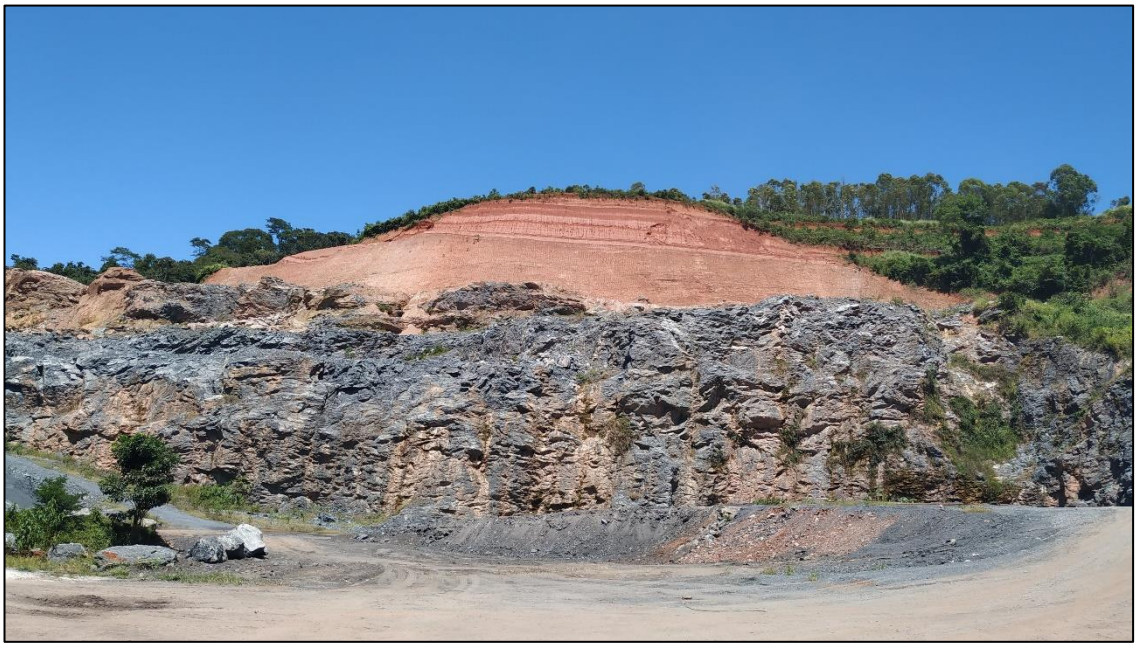
Em 2013, a fazenda na qual o empreendimento está localizado, contava com uma área de aproximadamente 60 ha, sendo 50 ha a poligonal cedida pelo DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), atual ANM (Agência Nacional de Mineração), para desenvolvimento das atividades mineiras. Esta área conta com a jazida mineral, planta de britagem do minério e áreas de apoio, como mostrado, parcialmente, na Figura 7. Sua reserva estimada, no ano de 2013, era de 3,40 milhões de toneladas, lavrada a uma taxa média de 100 mil toneladas por ano, o que resulta em uma vida útil aproximada de 34 anos.

Figura 7 - Vista superior da planta de britagem e instalações

Fonte: Próprio autor

O calcário é lavrado em bancadas de altura média de 20 m e conta com uma cobertura de estéril, o filito em estudo, e material orgânico, conforme mostrado na Figura 8. Tais materiais são manipulados na etapa de decapeamento, lavrados por desmonte mecânico e são depositados em pilhas de estéril. Até 2013, a estrutura tinha capacidade de armazenamento de 1.000 m² de material, mas foi ampliada para uma área de 2,8 ha, na qual passou a receber material em bancadas de 5 m de altura, com um ângulo do talude igual a 16º, com altura máxima igual a 15 m. A vida útil estimada para a estrutura é de 15 anos.

Figura 8 - Bancadas de calcário, estéril e matéria orgânica



Fonte: Próprio autor

As características físicas, químicas e mineralógicas do material foram levantadas por Costa (2019). O material, portanto, é composto basicamente por dióxido de sílica (SiO_2) (65,75%), óxido de alumínio (Al_2O_3) (15,70%) e óxido de ferro (III) (Fe_2O_3) (6,39%). Esses compostos se apresentam principalmente em quartzo, mica (fengita) e caulinita. Além disso, apresenta características tais como massa específica, umidade, área superficial específica iguais a 2,86 g/cm³, 4,23%, 17,7 m²/g, respectivamente.

3.2- Preparação das amostras

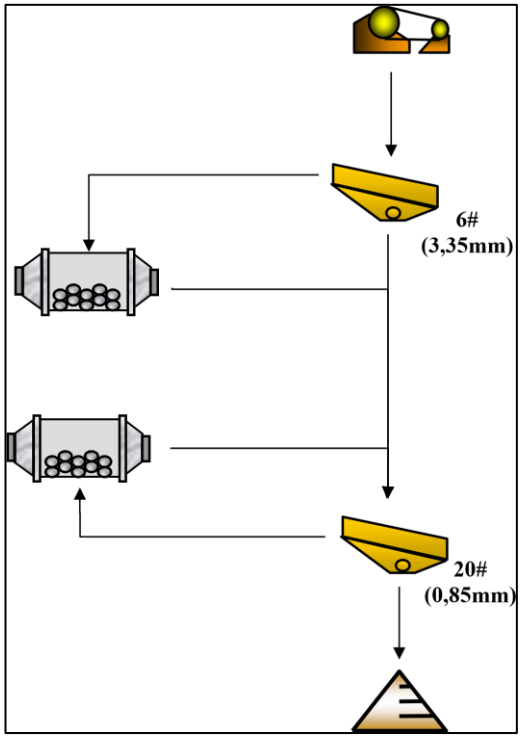
O material utilizado para a pesquisa foi previamente coletado conforme a ABNT NBR 10007 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004b) para a realização do trabalho intitulado “Caracterização de filito para utilização como substituinte parcial de cal em argamassa de revestimento – aproveitamento de estéril” (COSTA, 2019). A rocha apresentava uma ampla faixa granulométrica, variando de aproximadamente 6 cm a <0,1 mm, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Granulometria inicial

Fonte: Próprio autor

O material, total de 49,905kg, então foi submetido as etapas de cominuição e peneiramento, conforme esquematizado na Figura 10. As etapas de cominuição incluíram britagem e moagem. Britagem realizada em britador de mandíbula do tipo Dodge, com o set de abertura ajustado na posição ½”, trabalhando afogado. Após a britagem, a rocha foi separada em peneira de malha 6# (3,35mm) e moído em moinho de revestimento cerâmico de escala laboratorial, operando com uma rotação de 2,33 rpm. Os corpos moedores utilizados também de material cerâmico e de diâmetros variados, conforme representado na Figura 11. A segunda etapa de peneiramento foi realizada em peneira de malha 20# (0,85mm).

Figura 10 - Fluxograma da etapa de cominuição



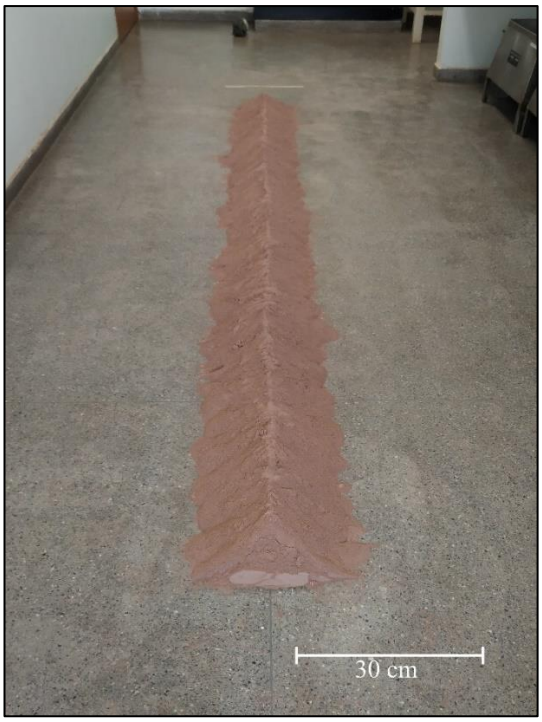
Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Carga moedora

Fonte: Próprio autor

Em seguida o material foi homogeneizado e disposto em uma pilha alongada de 420 cm, reintegrando 10% das bordas à pilha ao final sobre o chão do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG campus Araxá, conforme a Figura 12, e quarteado.

Figura 12 - Pilha alongada



Fonte: Próprio autor

Parte do material quarteado, uma alíquota de 3kg, seguiu para uma segunda etapa de cominuição. Dessa vez a cominuição foi feita manualmente com o auxílio de almofariz e pilão de cerâmica e preparado em peneira de malha 200# (0,074mm).

O restante do material foi peneirado em peneirador de bancada, conforme a Figura 13, em faixas granulométricas conforme a Tabela 3, seguindo a série de Tyler. A tabela também apresenta as granulometrias em milímetro.

Figura 13 - Peneirador e sequência de peneiras

Fonte: Próprio autor

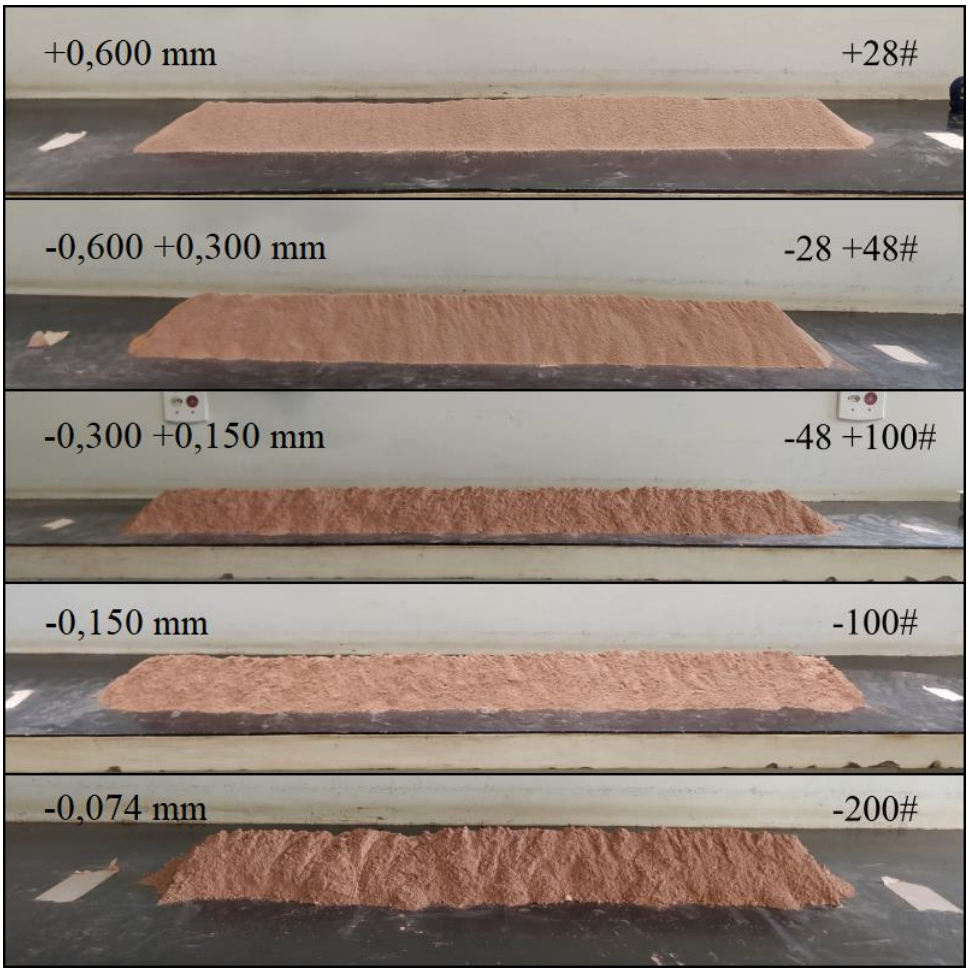
Tabela 3 - Faixa granulométrica

Faixa granulométrica	
(#)	**(mm)**
+28	+0,600
-28 +48	-600 +0,300
-48 +100	-0,300 +0,150
-100	-0,150

Fonte: Próprio autor

Ao fim do peneiramento, todas as faixas granulométricas foram dispostas sobre uma bancada limpa formando pilhas alongadas, das quais foram amostradas porções para a realização dos testes de caracterização e alíquotas para os testes de aplicação em argamassa. Para o material passante da peneira de 200# foi realizada uma pilha de 1 metro. Já para os materiais de faixas granulométricas +28 (>0,600 mm) e -28+48 (0,600 >0,300 mm), foram realizadas pilhas de 1,5 metros. Por fim, as pilhas dos materiais de granulometria -48+100 (0,300>0,150 mm) e -100 (<0,150 mm) apresentaram comprimento de pilhas igual a 2 metros. Para todas as pilhas foram reintegrados 10% do material presente nas extremidades. A variação de comprimento das pilhas se deu devido ao volume de material em cada faixa granulométrica. A Figura 14 representa as pilhas conforme a granulometria.

Figura 14 - Pilhas alongadas



Fonte: Próprio autor

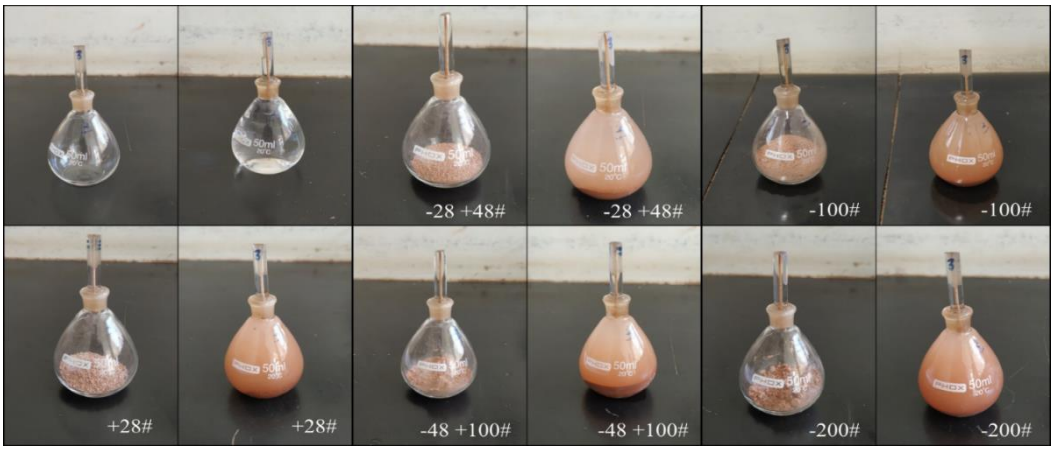
3.3- Caracterização do filito e constituintes da argamassa

Os materiais, preparados e cominuídos, seguiram para as etapas de caracterização conforme as normas vigentes para cada material. O filito foi caracterizado quanto à densidade pelo método de picnometria. Já os constituintes da argamassa tiveram suas massas específicas caracterizadas conforme as normas ABNT NBR NM 52: 2009, ABNT NBR 16605: 2017, para a areia e cimento, respectivamente, e pelo método de picnometria para a cal, e massas unitárias conforme as normas ABNT NBR NM 45: 2006 para a areia, enquanto para a cal, cimento e todas as faixas granulométricas do filito foi realizado a relação entre massa e volume em um recipiente de massa e volume conhecidos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, 2009b, 2017).

3.3.1- Caracterização do filito

Para caracterização do filito foram realizados testes de densidade para cada faixa granulométrica utilizando o método de picnometria. Para isso foi utilizado um picnômetro de 50ml e, para cada granulometria, foram pesados o picnômetro vazio (A1), picnômetro com a amostra (A2), picnômetro com amostra e água (A3), e picnômetro cheio de água (A3), conforme a Figura 15. O teste foi realizado em triplicada para todas as granulometrias. As densidades foram calculadas a partir da equação [1].

Figura 15 - Picnometria



Fonte: Próprio autor

$$\rho = \frac{(A_2 - A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_3 + A_1)} \quad [1]$$

Onde:

A_1: Massa do picnômetro vazio;

A_2: Massa do picnômetro + amostra;

A_3: Massa do picnômetro + amostra + água;

A_4: Massa do picnômetro + água.

Para a determinação das massas unitárias de todas as frações do filito foi realizado a relação entre massa e volume de um recipiente conhecido. Para isso foi pesado um recipiente de alumínio vazio coberto com uma placa de vidro. Em seguida pesou-se o mesmo sistema adicionando-se água destilada. Tal diferença resultou no volume do recipiente. Tendo então os dados do recipiente, seguiu-se para a medida de cada faixa granulométrica, que consistiu em preencher o recipiente com três camadas uniformes. Em seguida foi realizado o rasamento da superfície e a pesagem. Este procedimento foi realizado em duplicata para todas as granulometrias. O cálculo foi realizado conforme a equação [2].

$$\mu = \frac{(m_c - m_v)}{V} \quad [2]$$

Onde:

μ: massa unitária, em quilogramas por metro cúbico;

m_c: massa do recipiente + material, em quilogramas;

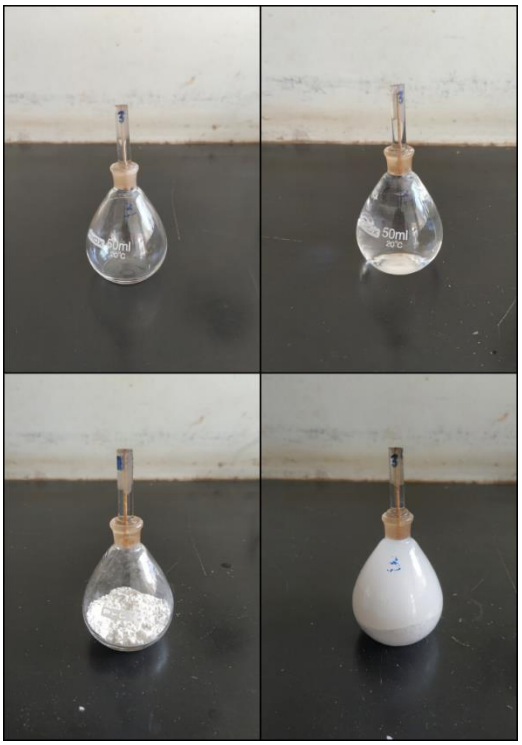
m_v: massa do recipiente, em quilogramas;

V: volume do recipiente, em metro cúbico.

3.3.2- Caracterização dos constituintes da argamassa

Para a areia, cal e cimento foram realizados testes de massa específica, conforme a norma regente para cada material. A metodologia empregada para determinação da massa específica da cal foi o método de picnometria. A Figura 16 representa a sequência da picnometria da cal. O ensaio foi realizado em triplicata e para o cálculo da massa específica foi utilizado a equação [1].

Figura 16 - Picnometria da cal



Fonte: Próprio autor

A massa específica do cimento foi determinada conforme a norma ABNT NBR 16605: 2017. Para isso, com a ajuda de um funil de haste longa, foi inserido querosene até o nível compreendido entre as marcas correspondentes a zero e um no frasco volumétrico de Le Chatelier. Em seguida, o frasco foi levado ao banho por 30 minutos e o volume registrado (V_1). Ao final do tempo, foi inserida uma massa conhecida de cimento atentando para que não

houvesse aderência do material as paredes internas do frasco. Por fim, o conjunto foi levado novamente ao banho por mais 30 minutos e o volume (V_2) registrado. A sequência seguida pode ser visualizada na Figura 17. A equação [3] foi utilizada para o cálculo da massa específica do cimento. O teste foi realizado em duplicata (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) .

Figura 17 - Determinação da massa específica do cimento

Fonte: Próprio autor

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \qquad [3]$$

Onde:

ρ: massa específica, em gramas por centímetro cúbico;

m: massa do material ensaiado, em gramas;

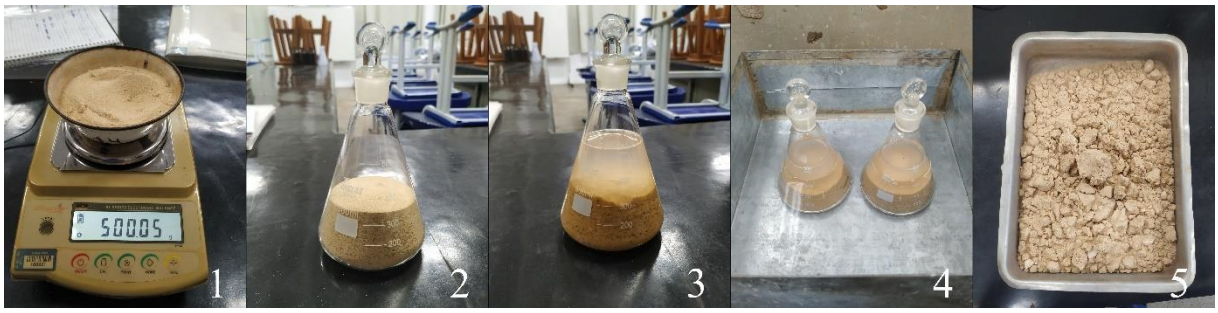
V_2: volume aferido após o banho, em centímetros cúbicos;

V_1: volume aferido antes o banho, em centímetros cúbicos;

Para a determinação da massa específica do agregado miúdo foi seguida a metodologia conforme descrito na norma ABNT NBR NM 52: 2009. Primeiramente foram pesados 500g de agregado miúdo (m_s), inseridos no frasco aferido de capacidade igual a 500ml e pesado o conjunto (m_1). Em seguida foi acrescentado água até a marca de 500ml e colocado em banho maria por 60 minutos. Após este tempo foi completado água até a marca de 500ml e pesado novamente o conjunto (m_2). Por fim, todo o agregado foi retirado do frasco e seco em estufa a

100ºC por 24 horas. Quando seco, o agregado foi pesado (m) e a massa específica determinada através das equações [4] e [5]. A sequência descrita é representada pela Figura 18. O teste foi realizado em duplicata (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

Figura 18 - Determinação da massa específica do agregado miúdo



Fonte: Próprio autor

$$d = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \qquad [4]$$

Sendo:

$$V_a = \frac{m_1 - m_2}{\rho_a} \qquad [5]$$

Onde:

m: massa da amostra seca em estufa, em gramas;

m_1: massa do frasco e agregado, em gramas;

m_2: massa do frasco, agregado e água após o banho, em gramas;

m_s: massa inicial de agregado, em gramas;

ρ_a: massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico;

V: volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a: volume de água adicionado, em centímetros cúbicos.

A metodologia empregada para a determinação das massas unitárias da cal e do cimento foi a mesma adotada para a determinação das massas unitárias das faixas granulométricas do filito, conforme descrito no item 3.3.1. Já para o agregado miúdo foram seguidas as recomendações conforme a norma ABNT NBR NM 45:2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

Para isso foi escolhido um recipiente com diâmetro interno igual a 220 mm e altura interna igual a 268 mm. O mesmo foi pesado vazio e em seguida completado com água e novamente pesado. A diferença resulta no volume do recipiente. Em seguida encheu-se o recipiente até um terço de sua capacidade, nivelou-se a superfície e aplicou-se 25 golpes com uma haste de adensamento uniformemente por toda a superfície do material. Este procedimento foi repetido duas vezes, até encher o recipiente, evitando com que a haste penetrasse na camada anterior. Ao fim, o recipiente foi pesado. O cálculo foi realizado com ajuda da equação [2].

3.4- Caracterização da argamassa com adição filítica

Em um primeiro instante foram definidas as substituições e proporções dos materiais constituintes da argamassa de forma teórica. O filito teve duas destinações, sendo elas, aplicação como substituinte parcial de cal e como substituinte de agregado miúdo. Para isso, foi definido um traço em volume igual a 1:1:6, conforme usual na literatura (AMARAL et al., 2020; AZEVEDO et al., 2020a, 2020b; DE AZEVEDO et al., 2018; MARVILA et al., 2019; MARVILA; AZEVEDO; MONTEIRO, 2020). Para as substituições de cal foi tomado como valor máximo aquele utilizado no trabalho inicial intitulado “Caracterização de filito para utilização como substituinte parcial de cal em argamassa de revestimento – aproveitamento de estéril” e adicionado um valor intermediário. A granulometria utilizada foi igual a apresentada pelo fabricante de cal, ou seja, passante da peneira de 200# (ou 0,074mm). Já para as substituições de agregado miúdo, foi definido um valor máximo de 50% do total. Este material foi classificado em diferentes granulometrias, seguindo as séries normais e intermediárias descritas na norma ABNT NBR 7211:2019. As proporções de cada faixa granulométrica segue as especificações da norma ABNT NBR 7211: 2019, conforme Tabela 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Tabela 4 - Frações de material por granulometria

Granulometria (mm)	% Retido Simples	% Retido acumulado
0,6	35,0%	35,0%
0,3	30,0%	65,0%
0,15	25,0%	90,0%
-0,15	10,0%	100,0%

Fonte: Adaptado de ABNT (2019)

Tendo então definido as proporções de cada substituição e, visto que traços em volume apresentam menor exatidão, foi definido o valor em massa dos constituintes para a massa padrão, com base na transformação de volume em peso, utilizando os valores de massa unitária obtidos, mantendo a massa máxima igual a 3kg, conforme a capacidade da cuba da argamassadeira. Para a argamassa padrão foram utilizados Cimento Portland CP-II E32, cal hidratada e agregado miúdo. As substituições foram feitas sob o valor em massa calculada para a argamassa padrão. Os valores de massa e traço podem ser encontrados no Apêndice A. A Tabela 5 apresenta os traços em volume e peso utilizados.

Tabela 5 - Substituições realizadas

CÓDIGO	SUBSTITUIÇÕES	TRAÇO EM VOLUME	TRAÇO EM PESO
PADRÃO	Argamassa padrão	1:1:6	1:0,64:7,78
C1A1	100% Cal 0% Filito 50% Filito (agregado)	1:1:3:3	1,0;0,64;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39
C2A0	62,5% Cal 37,5% Filito 0% Filito (agregado)	1:0,625:0,375:6	1;0,4;0,24;7,78
C2A1	62,5% Cal 37,5% Filito 50% Filito (agregado)	1:0,625:0,375:3:3	1;0,4;0,24;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39
C3A0	25% Cal 75% Filito 0% Filito (agregado)	1:0,25:0,75:6	1;0,16;0,48;7,78
C3A1	25% Cal 75% Filito 50% Filito (agregado)	1:0,25:0,75:3:3	1;0,16;0,48;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39

Fonte: Próprio autor

Em seguida todos os materiais secos foram pesados, homogeneizados e armazenados em sacos vedados. Para a determinação do volume de água e, consequentemente, a relação água/cimento, foi adicionada água à mistura até que a mesma apresentasse características plásticas e boa aderência à parede. Por ausência de equipamentos, não foi realizado o teste de consistência conforme a norma ABNT NBR 13276:2016. A fim de permitir que os resultados fossem comparados, manteve-se a relação água/cimento constante e igual a 1,88 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

As confecções das argamassas foram realizadas seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 16541:2016, com algumas alterações conforme disponibilidades técnicas e de equipamentos. Para isso foi adicionada à cuba da argamassadeira todo o material seco previamente pesado e homogeneizado. Em seguida o misturador foi acionado e adicionado 600ml de água em um intervalo de 30 segundos. Após esse tempo, o material foi misturado por mais 30 segundos. Ao fim desse tempo, o misturador foi desligado por 60 segundos, os quais foram utilizados para retirar a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá, com a

ajuda de uma espátula, para que todo material fosse misturado corretamente. Em seguida o misturador foi ligado novamente por mais 60 segundos. Todo o processo foi realizado em velocidade baixa, a fim de evitar perda de material (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016b).

Foram realizadas três bateladas para cada traço. A primeira batelada consistiu na preparação da argamassa para moldagem dos corpos de prova cilíndricos 5x10 para a realização do teste de resistência a compressão uniaxial e corpos de prova cúbicos 5x5x5 para o teste de permeabilidade de água. A segunda batelada resultou em uma segunda preparação de argamassa para a realização do teste de densidade em estado fresco e teor de ar incorporado, e teste de retenção de água. Já a argamassa da terceira batelada foi destinada à aplicação em parede chapiscada para análise qualitativa do desempenho da argamassa submetida às intempéries de uma área externa e teste de permeabilidade de água.

3.4.1- Moldagem dos corpos de prova cúbicos

Para o teste de permeabilidade, a ser descrito no item 3.4.4, foram moldados, ao total, 3 corpos de prova cúbicos de 5x5x5 cm para cada traço. A argamassa foi preparada conforme descrito no item 3.4 e a moldagem foi realizada imediatamente após o preparo da argamassa.

Para isso, com ajuda de uma espátula, foram colocadas duas camadas de alturas aproximadamente iguais em cada molde, mostrados na Figura 19, deixando um excesso acima da borda superior. Cada camada recebeu 25 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com o soquete metálico. Em seguida foi retirado o excesso de massa com ajuda de uma espátula metálica, nivelando sua superfície. Após 48 horas de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e mantidos ao ar por 28 dias. Por se tratar de argamassa de cal com materiais alternativos optou-se por desenformar os corpos de prova após 48 horas de cura.

Figura 19 – Molde de corpos de prova cúbicos

Fonte: Próprio autor

3.4.2- Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

Para os testes de compressão uniaxial e densidade no estado endurecido, ensaios a serem detalhados nos itens 3.4.3 e 3.4.6, respectivamente, foram moldados, ao total, 6 corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm para cada traço. A argamassa foi preparada conforme descrito no item 3.4 e a moldagem foi realizada imediatamente após o preparo da argamassa.

Para isso, com ajuda de uma espátula, foram colocadas quatro camadas de alturas aproximadamente iguais em cada molde, conforme mostrado na Figura 20, deixando um excesso acima da borda superior. Cada camada recebeu 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com o soquete metálico. Em seguida foi retirado o excesso de massa com ajuda de uma espátula metálica, nivelando sua superfície. Após 48 horas de cura inicial os corpos de prova foram desmoldados, identificados e mantidos ao ar por 28 dias. Por se tratar de argamassa de cal com materiais alternativos optou-se por desenformar os corpos de prova após 48 horas de cura por tenderem a apresentar maior fragilidade.

Figura 20 – Molde de corpos de prova cilíndricos

Fonte: Próprio autor

3.4.3- Compressão uniaxial de corpos de prova

Para a determinação da resistência a compressão, os corpos de prova, após 28 dias de cura ao ar, foram submetidos a ruptura em prensa hidráulica de acionamento elétrico, colocados sobre o prato inferior da prensa, limpo e centrado em relação ao eixo de carregamento e rompidos, conforme descrito na norma ABNT NBR 13279:2005. Os valores de força de rupturas anotados e a resistência calculada a partir da razão entre força de ruptura e área nominal da seção do corpo de prova, com um desvio relativo máximo de 6%. A resistência a compressão é calculada conforme a equação [6] (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b).

$$R_c = \frac{F_c}{A} \qquad [6]$$

Onde:

R_c: resistência à compressão, em MPa (N/mm²);

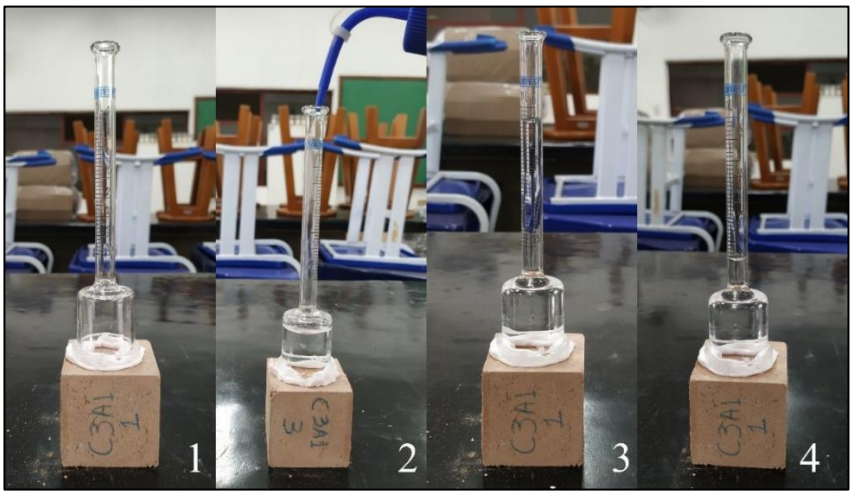
F_c: carga máxima aplicada, em newtons (N);

A: área da seção circular do corpo de prova, em milímetros quadrados (mm²).

3.4.4- Teste de permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da argamassa foram seguidas as especificações da norma ABNT NBR 14992:2003 – anexo G. Apesar da norma ser referente a argamassas para rejunte, Almeida Dias e Carasek (2003) e Temp (2014) apontam o teste como uma alternativa eficiente e de baixo custo para analisar a propriedade em argamassas de revestimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Portanto, para a realização do teste foram utilizados tubos de Karsten, que consistem em cachimbos graduados de vidros. Estes foram posicionados sobre os corpos de provas cúbicos após 28 dias de cura, usando alginato, que se trata de um hidrocoloide irreversível, para selar e fixar os tubos nos corpos de prova. Um cronômetro se fez necessário para determinação do tempo de absorção de água. A Figura 21 apresenta a sequência do teste. Para cada traço foram realizados três testes de permeabilidade. Nos cachimbos fixados nos corpos de prova com ajuda do alginato foi adicionada água até o nível de referência zero. Em seguida o cronômetro foi acionado e registradas as leituras de tempo ao absorver 1,5 ml e 3,5 ml. A escolha de tais valores se deu pela velocidade em que a absorção ocorreu durante o teste.

Figura 21 - Teste de permeabilidade em blocos cúbicos



Fonte: Próprio autor

3.4.5- Densidade em estado fresco e teor de ar incorporado

O teste de densidade em estado fresco foi realizado conforme a norma ABNT NBR 13278:2005. Para isso foi inserido em um recipiente cilíndrico de alumínio de volume definido, três camadas de material com a ajuda de uma espátula. Entre cada camada foram conferidos 20 golpes com uma espátula ao longo do perímetro para acomodar a argamassa. Em seguida foram executadas três quedas do recipiente a uma altura média de 3cm e a superfície rasada com uma espátula metálica. Ao fim desta etapa, pesou-se o conjunto e a densidade calculada conforme a equação [7] (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c).

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r}\ x\ 100 \qquad [7]$$

Onde:

d: densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

m_c: massa do recipiente contendo a argamassa, em gramas (g);

m_v: massa do recipiente vazio, em gramas (g);

v_r: volume do recipiente, em centímetros cúbicos (cm³).

Para a determinação do teor de ar incorporado (A) foi definida a densidade de massa teórica (d_t) conforme a equação [8] e calculado seguindo a equação [9].

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \qquad [8]$$

Onde:

m_i: massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa de água, em gramas;

γ_i: massa específica de cada componente da argamassa, em gramas por centímetro cúbico.

$$A = 100\left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \qquad [9]$$

Onde:

d_t: densidade de massa teórica, em gramas por centímetro cúbico;

d: densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, conforme determinado pela equação [7].

3.4.6- Densidade em estado endurecido

Para a determinação da densidade em estado endurecido foram utilizados três corpos de provas cilíndricos, moldados conforme o item 3.4.2, todos com tempo de cura igual a 28 dias. Com a ajuda de um paquímetro foram determinadas as dimensões de cada corpo de prova tanto de comprimento como de diâmetro. Com isso, foi calculado o volume dos corpos de prova conforme a equação [10]. Foram seguidas as especificações conforme a norma ABNT NBR 13280:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005d).

$$v = \frac{\pi . h . d^2}{4} \qquad [10]$$

Onde:

h: altura média de três medições, em centímetros;

d: diâmetro médio de três medições, em centímetros.

Em seguida foram pesados os corpos de prova (m) e determinada a densidade de massa ($\rho_{máx}$), em quilograma por metro cúbico, através da equação [11].

$$\rho_{máx} = \frac{m}{v}\ x\ 1000 \qquad [11]$$

3.4.7- Retenção de água

O teste de retenção de água foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 13277:2005 com algumas alterações conforme a disposição de equipamentos no laboratório. Foi utilizado um funil de Buchner de 13cm de diâmetro interno acoplado a um balão Kitasato, vedado com alginato e válvula de silicone. A vidraria foi conectada a uma bomba de vácuo. O equipamento utilizado está mostrado na Figura 22 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b).

Figura 22 - Equipamentos utilizados no teste de retenção de água

Fonte: Próprio autor

Primeiramente foi inserido um disco de papel-filtro sobre o fundo do filtro Buchner e umedecido. Logo após, a bomba foi acionada por 90s a uma pressão correspondente a 51 mm de mercúrio para retirar o excesso de água e o conjunto pesado (m_v). Em seguida preencheu-se o funil com a argamassa preparada conforme descrito no item 3.4 em uma camada e adensada com um soquete metálico, realizando no total 37 golpes, sendo 16 junto à borda e 21 distribuídos no centro. Ao final, foi retirado o excesso de massa e alisada a superfície. Todo o conjunto foi pesado (m_a).

Por fim foi acionada a bomba de pressão por 15 minutos a uma sucção correspondente a 51 mm de mercúrio. Novamente o sistema foi pesado (m_s) e o resultado da retenção de água para cada traço calculado conforme a equação [12].

$$Ra = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF\ (m_a - m_v)}\right] x100 \qquad [12]$$

Sendo AF o fator água/argamassa fresca, calculada conforme a equação [13].

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \qquad [13]$$

Onde:

m_w: massa total de água adicionada à mistura em gramas;

m: massa seca de argamassa.

3.4.8- Aplicação em parede chapiscada

Para a realização do teste, a argamassa foi preparada conforme descrito no item 3.4 e aplicada em parede com a ajuda de uma colher de pedreiro e posteriormente nivelada com uma desempenadeira. A aplicação teve como objetivo analisar a aderência à uma superfície chapiscada, bem como analisar o comportamento das massas quando submetidas a intempéries como sol, chuva e possíveis intempéries biológicas. A Figura 23 expõe a sequência de aplicação da argamassa na parede chapiscada.

Figura 23 - Aplicação em parede

Fonte: Próprio autor

De forma semelhante ao descrito no item 3.4.4, foi realizado também o teste de permeabilidade nas aplicações em parede. Neste caso foram utilizados tubos de Karsten com forma em “L” para melhor fixação na parede. Três cachimbos foram fixados na aplicação com ajuda do alginato e logo em seguida completados com água até o nível de referência zero. Em seguida o cronômetro foi acionado e registradas as leituras de duas maneiras. A primeira consistiu em registrar o tempo a cada diminuição de 0,5 ml e a segunda, anotar a leitura do valor absorvido em intervalos de 15 minutos. A Figura 24 mostra o teste sendo realizado.

Figura 24 - Teste de permeabilidade na aplicação em parede

Fonte: Próprio autor

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item contempla os resultados dos testes realizados ao longo da pesquisa e descritos anteriormente.

4.1 – Preparação das amostras

4.1.1 Análise visual

Durante a preparação das amostras foram observadas algumas questões:

1. Em granulometrias mais grosseiras o material é friável. À medida que se reduz a granulometria aumenta-se a dificuldade de fragmentação. Tal efeito é associado a presença de minerais mais duros, como o quartzo.
2. Após a etapa de moagem, observa-se uma mudança de cor no material, tornando-se mais rosado. Isso é devido a liberação de alguns minerais. Essa segregação também é vista com o peneiramento. O material retido apresenta coloração mais escura (mais marrom) do que o passante (mais rosada).
3. Foi observada a presença de algumas fases do material com maior dureza e, portanto, maior resistência a fragmentação. Essas amostras mais duras podem estar associadas a uma maior concentração de materiais de maior dureza.

4.1.2 Caracterização do filito e dos componentes da argamassa

Os resultados dos testes de massa específica e unitária para o filito em cada granulometria e para os constituintes da argamassa estão representados na Tabela 6. Nota-se que os valores de massa específica e unitária do filito -200# (<0,075mm) se assemelha ao valor da cal, a qual será substituída. Além disso, esses valores nas outras faixas granulométricas do filito também se assemelham aos da areia, que também será substituída por esses materiais em diferentes proporções.

Tabela 6 - Massas específicas e unitárias

	Cal	Filito +28# >0,6 mm	Filito -28# +48# 0,3<0,6 mm	Filito -48# +100# 0,3<0,15 mm	Filito -100# <0,15 mm	Filito -200# <0,075 mm	Cimento	Areia
Massa específica	2,27	2,33	2,35	2,40	2,44	2,46	3,05	2,43
Massa unitária	0,70	1,00	0,98	0,89	0,76	0,67	1,08	1,40

Fonte: Próprio autor

4.2- Moldagem dos corpos de prova cúbicos

Os corpos de prova cúbicos utilizados nos testes de permeabilidade estão ilustrados na Figura 25 desenformados após 48 horas de cura.

Figura 25 - Copos de prova cúbicos

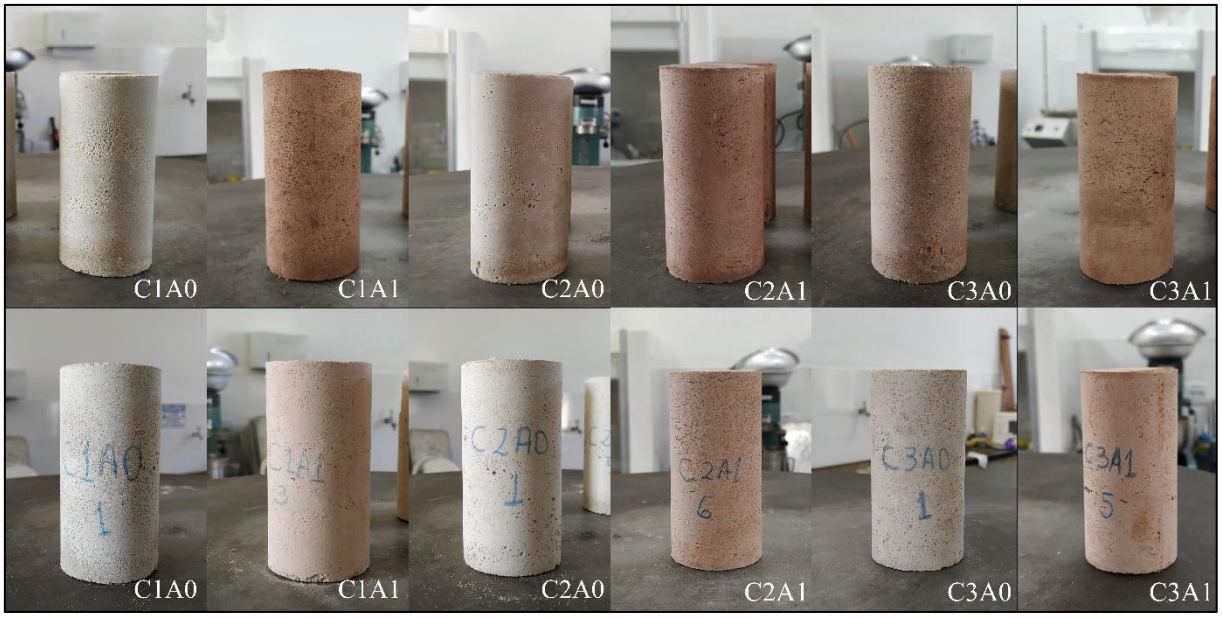
Fonte: Próprio autor

4.3 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

Os corpos de prova cilíndricos utilizados nos testes de densidade em estado endurecido e resistência a compressão uniaxial estão ilustrados na Figura 26. A figura representa os corpos de prova desenformados após 48 horas de cura (superior) e após 28 dias de cura (inferior). Nota-

se que a presença de filito na composição altera a cor do corpo de prova, além de conferir a eles maior resistência superficial, medida empiricamente através do teste de risco da superfície.

Figura 26 - Corpos de prova cilíndricos



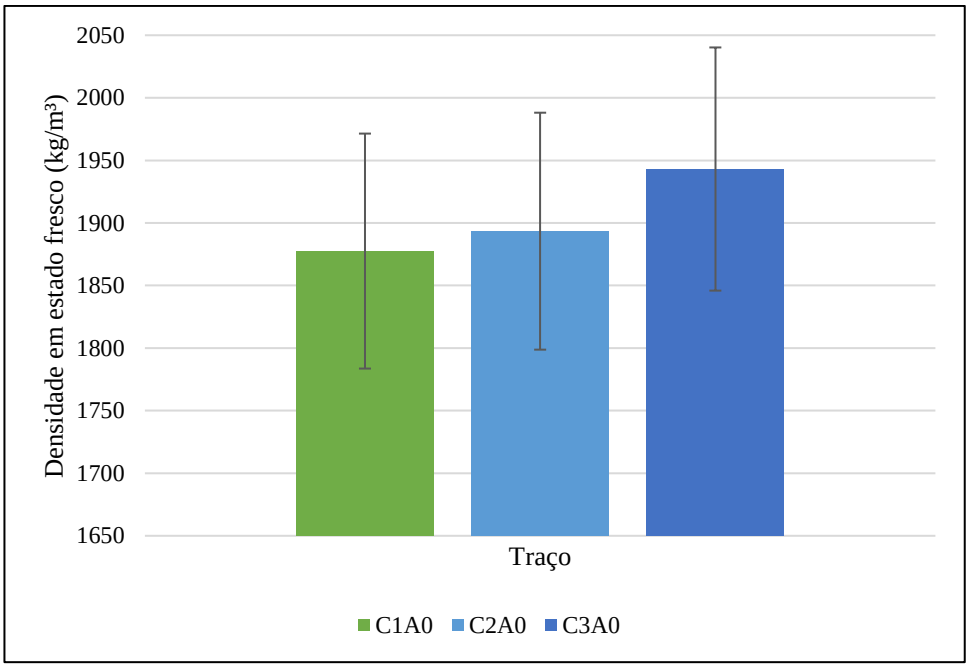
Fonte: Próprio autor

4.4 - Densidade em estado frescos e teor de ar incorporado

A Figura 27 apresenta os resultados do teste de densidade em estado fresco para os traços que substituem apenas a cal. Nota-se que a presença do filito tornou a mistura mais densa, portando C3A0 apresentou maior valor de densidade seguido por C2A0 e C1A0, na sequência.

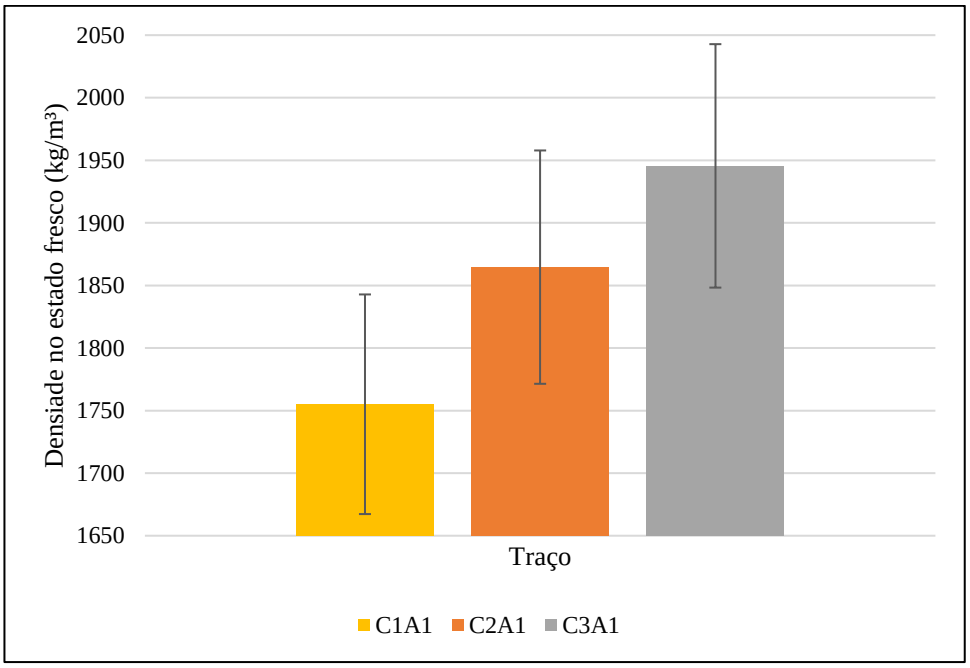
Já na Figura 28 estão apresentados graficamente os resultados das substituições A1, ou seja, aquelas que apresentam filito também como substituinte de agregado miúdo. Nota-se que o filito também influenciou na densidade da argamassa, porém C3A1 apresentou maior valor, seguido do C2A1 e C1A1. Assim, segundo Carasek (2010), todos os traços realizados classificam as argamassas produzidas como normais (na classificação entre leve, normais e pesadas) quanto à densidade de massa, por compreenderem valor de densidade entre 2,30 e 1,40 g/cm³.

Figura 27 - Teste de densidade em estado fresco substituições A0



Fonte: Próprio autor

Figura 28 - Teste de densidade em estado fresco substituições A1



Fonte: Próprio autor

A partir dos resultados de densidade, foi possível calcular o teor de ar incorporado, expressos na Tabela 7. Nota-se que o valor de teor de ar cresce inversamente ao crescimento da densidade em estado fresco.

Tabela 7 - Teor de ar incorporado

Teste	Teor de ar	Densidade (kg/m³)
C1A0	5,65	1877,53
C1A1	10,91	1755,06
C2A0	4,85	1893,43
C2A1	5,35	1864,64
C3A0	2,36	1943,09
C3A1	1,74	1945,55

Fonte: Próprio autor

Segundo Carasek (2010) a densidade em estado fresco influencia inversamente na trabalhabilidade da argamassa, ou seja, quanto menor a densidade da argamassa e maior o teor de ar incorporado na argamassa, maior a trabalhabilidade e menor é o esforço, feito pelo operador, em aplicar a argamassa.

4.5 - Densidade em estado endurecido

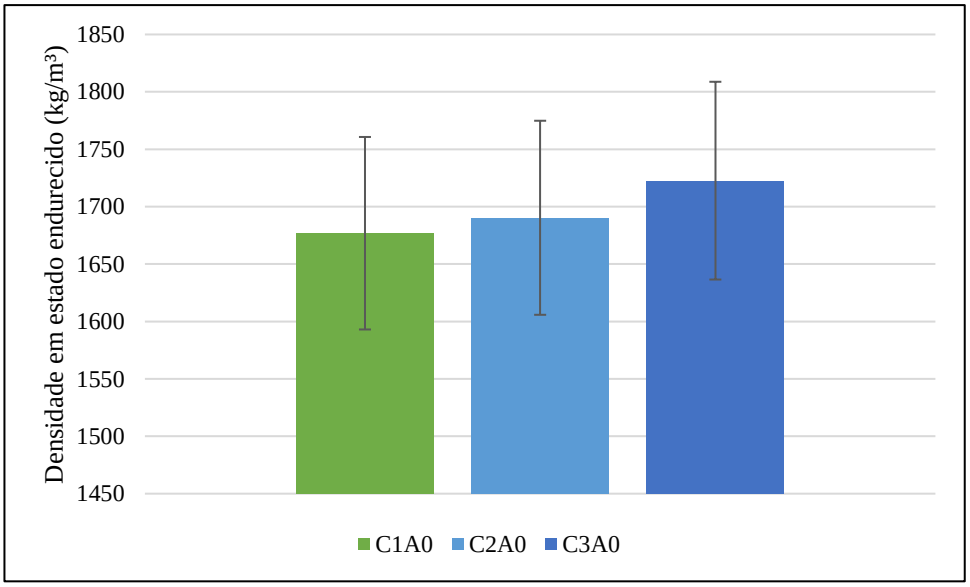
Os resultados do teste de densidade em estado endurecido para as substituições A0 estão ilustrados na Figura 29. Nota-se que o traço C3A0 apresentou o maior valor de densidade, seguido pelos traços C2A0 e C1A0, respectivamente.

Para as substituições A1, os resultados estão representados na Figura 30. Neste caso, C3A1 apresentou maior valor, em seguida o C2A1 e, por fim, o C1A1.

Em ambos os casos nota-se que, apesar do gradual aumento de densidade, tal valor de incremento não é extremo e representa, no maior caso, valor igual 2%.

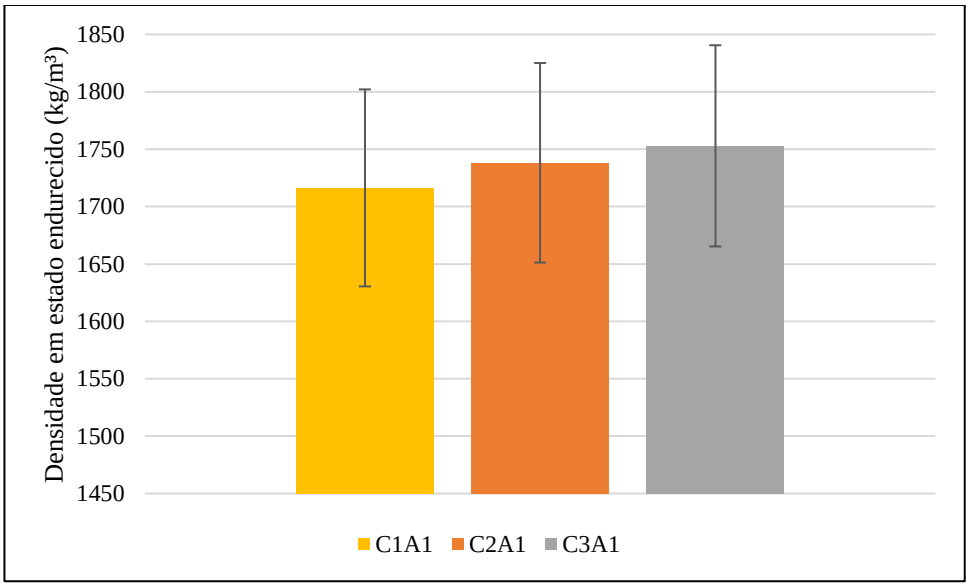
Sabe-se que a densidade em estado endurecido é inferior a densidade em estado fresco devido a saída parcial de água. Além disso, considera-se que a redução de densidade pelo método de secagem ao ar varia entre 3% a 11% em relação ao valor no estado fresco (CARASEK, 2010). Portanto, pode-se dizer que a presença do filito na massa resultou em uma maior manutenção de água durante o processo de secagem do corpo de prova ao ar. Apesar disso, foram obtidas variações de densidades iguais a 10,69%, 2,21%, 10,73%, 6,79%, 11,34% e 9,90% para as substituições C1A0, C1A1, C2A0, C2A1, C3A0 e C3A1 respectivamente.

Figura 29 - Resultado do teste de densidade em estado endurecido substituições A0



Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Resultado do teste de densidade em estado endurecido substituições A1



Fonte: Próprio autor

4.6 - Retenção de água

Carasek (2010) define retenção de água como sendo a capacidade da argamassa fresca em manter-se trabalhável ao ser sujeita a situações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação ou absorção de água da base. A propriedade influencia tanto

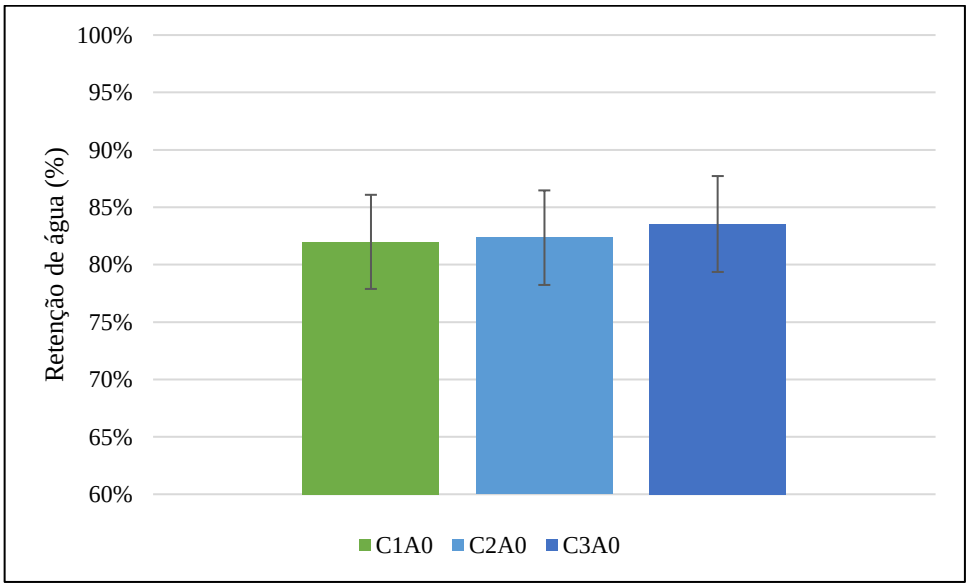
em propriedades no estado fresco como no processo de acabamento e retração plástica, como em propriedades no estado endurecido tais quais aderência, resistência mecânica final e durabilidade.

A Figura 31 apresenta os resultados do teste de retenção de água para as substituições A0. Constata-se que a presença do filito na argamassa melhora a propriedade de retenção de água, uma vez que todas as substituições apresentaram valores maiores que a argamassa padrão (C1A0). Seguiram-se os traços C3A0, C2A0 e C1A0 ordenados quanto aos melhores desempenho no teste.

Os traços que substituíram parcialmente o agregado miúdo (A1) estão representadas na Figura 32. Com isso, a substituição C1A1 apresentou melhor resultado no teste analisado, seguida pelo traço C2A1, C3A1, que apresentaram valores de retenção de água bastante semelhantes (95,16% e 95,11%, respectivamente).

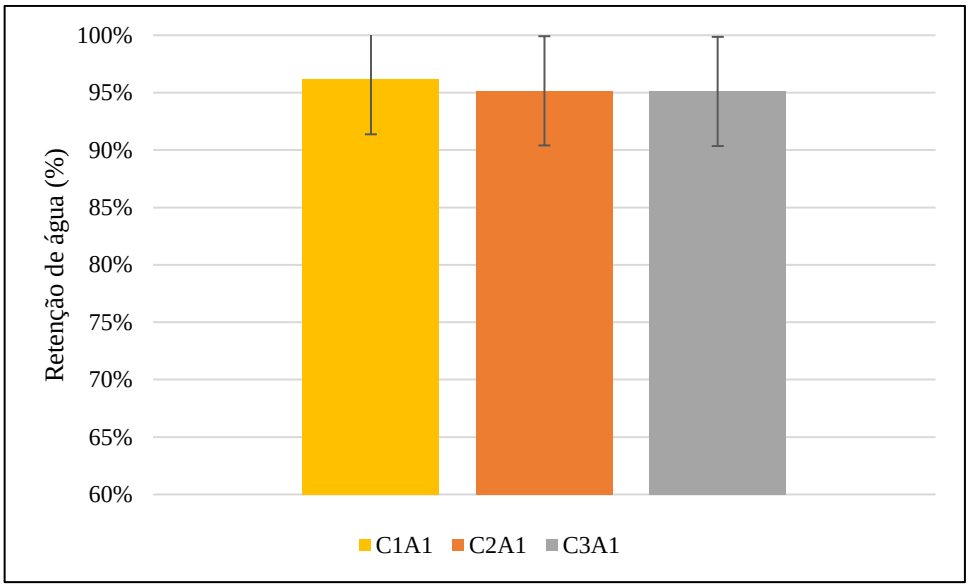
Segundo a norma americana ASTM C270-10 (2010), o valor mínimo de retenção de água para argamassas composta por cimento e cal é 75%, portanto todos os traços atendem os critérios de retenção de água segundo a norma.

Figura 31 - Resultado do teste de retenção de água substituições A0



Fonte: Próprio autor

Figura 32 - Resultado do teste de retenção de água substituições A1



Fonte: Próprio autor

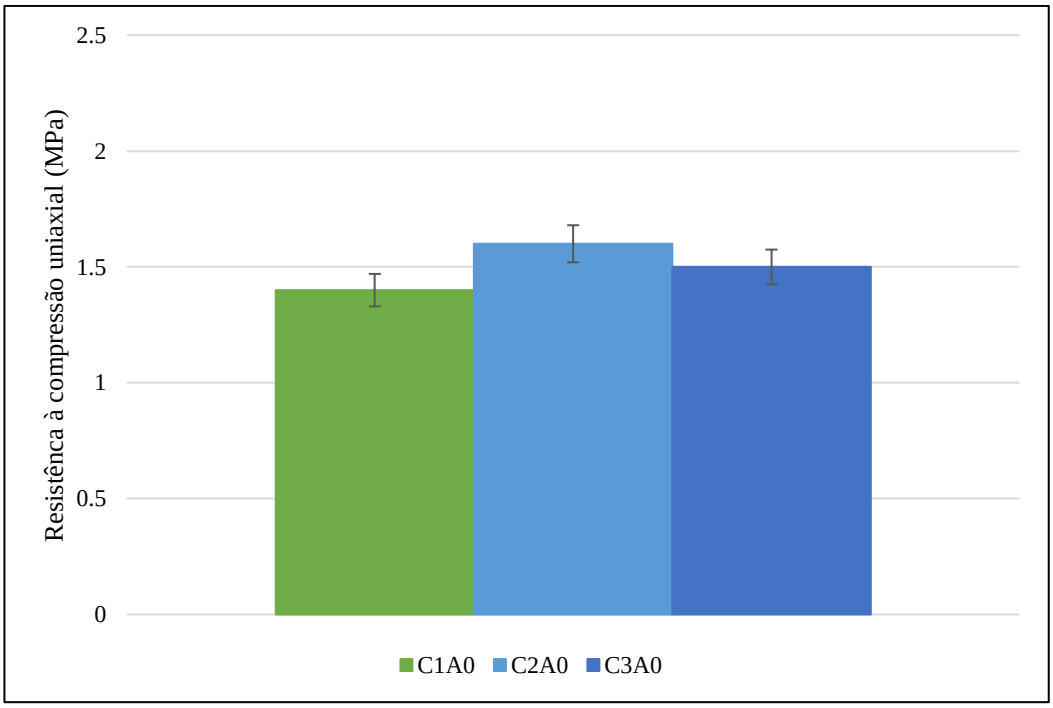
4.7- Compressão uniaxial de corpos de prova

A resistência mecânica, representada pelos esforços de cisalhamento, tração e compressão, consiste na capacidade dos revestimentos em absorverem esforços mecânicos de diversas origens. Tal propriedade influencia no aparecimento de microfissuras, rupturas, resistência superficial, que podem comprometer a aderência, estanqueidade e durabilidade de uma argamassa (CARASEK, 2010).

Os resultados do teste de compressão uniaxial para as substituições A0 estão sumarizados na Figura 33. C2A0 aparece com os maiores resultados, seguido por C3A0 e C1A0.

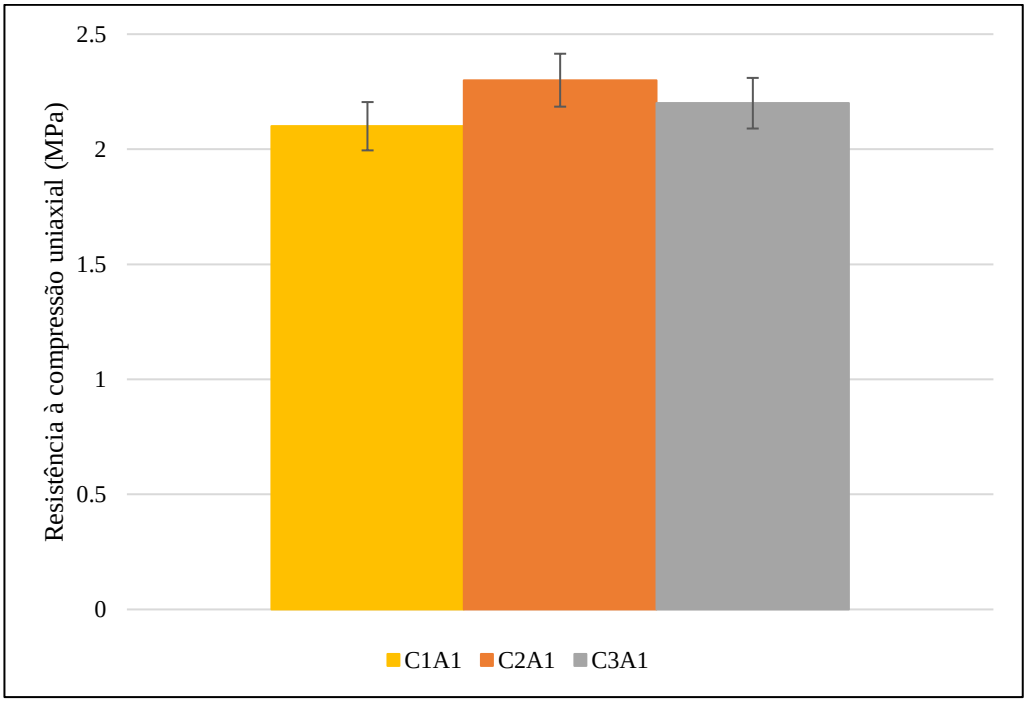
A Figura 34 apresenta os resultados para as substituições A1. Nota-se que os traços que apresentam filito em sua composição como substituinte de agregado miúdo apresentam maior resistência quando comparados com os demais. O traço C2A1, apresentou melhor desempenho no teste em questão, seguido pelo traço C3A1 e C1A1.

Figura 33- Resultados do teste de resistência à compressão uniaxial substituições A0



Fonte: Próprio autor

Figura 34 - Resultados do teste de resistência à compressão uniaxial substituições A1



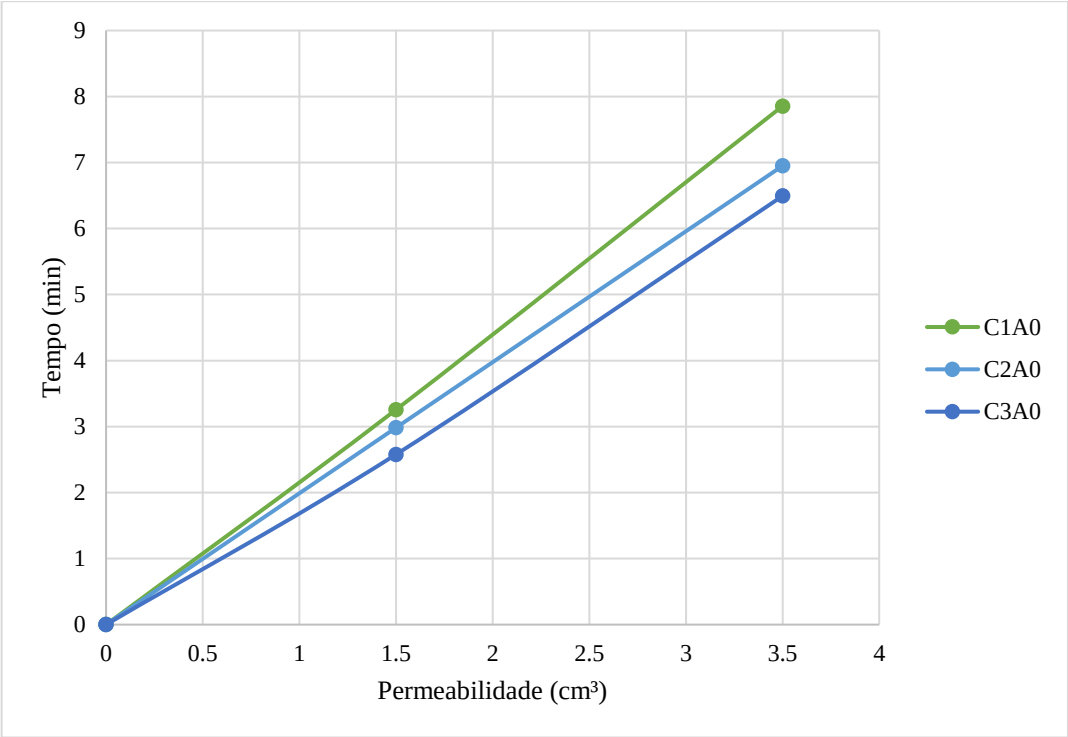
Fonte: Próprio autor

4.8 - Teste de permeabilidade

Em relação ao teste de permeabilidade, os resultados das substituições A0 estão representados na Figura 35. Observa-se que o traço C3A0 apresenta rendimento no teste, uma vez que absorveu menos água no espaço de tempo estipulado, seguido pelo traço C2A0 e C1A0, respectivamente.

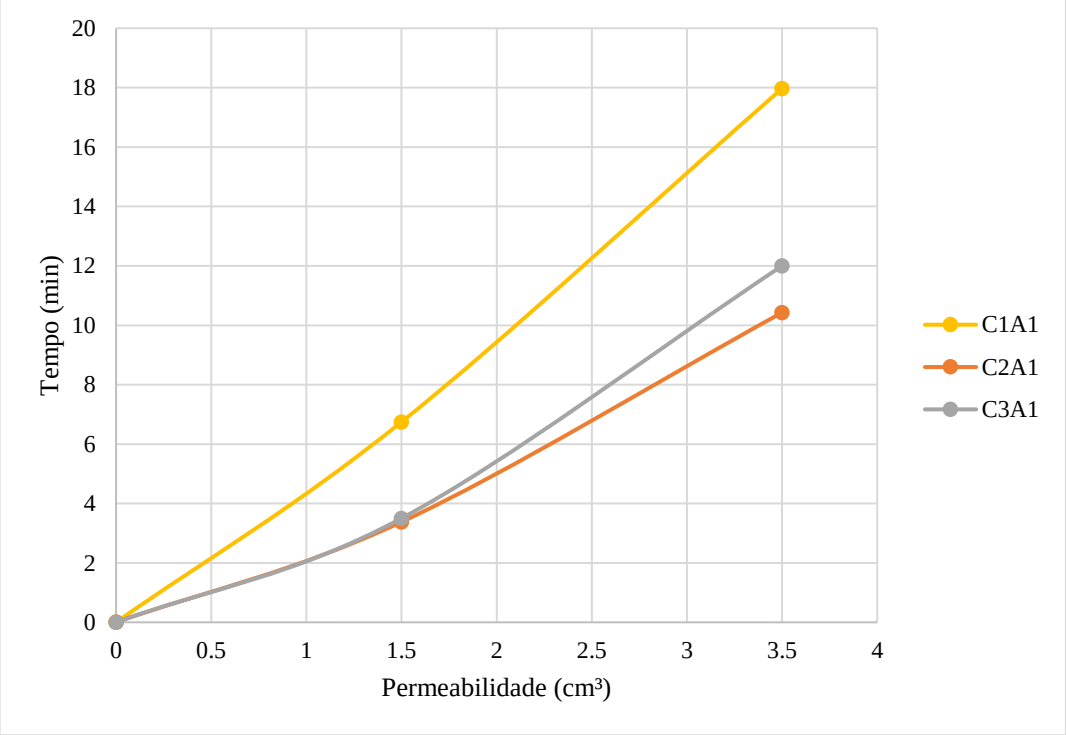
Quanto aos resultados das substituições A1, nota-se que C2A1 apresentou melhor rendimento, seguido pelo traço C3A1 e C1A1, conforme mostrado na Figura 36.

Figura 35 - Resultado do teste de permeabilidade substituições A0



Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Resultado do teste de permeabilidade substituições A1



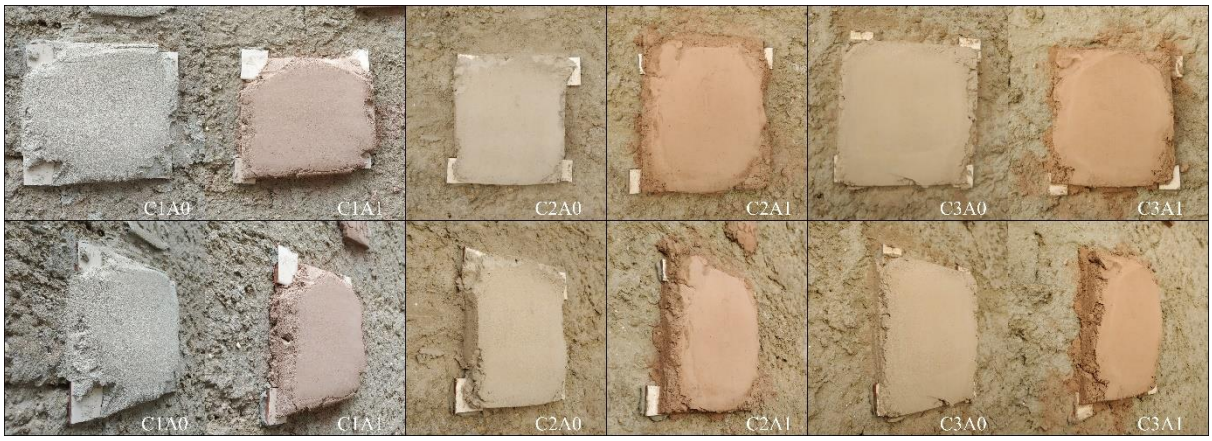
Fonte: Próprio autor

4.9 - Aplicação em parede chapiscada

As aplicações na parede se diferenciaram quanto a cor, textura, adesão a parede e aparecimento de trincas. Os traços que substituíram o agregado miúdo pelo filito se mostraram com cor mais rosada e textura mais lisa, enquanto aqueles que substituíram apenas a cal, apresentam cor acinzentada e aspecto mais áspero. Salienta-se que os traços C1A0, C2A0 e C3A0 se "esfarelam" mais, ou seja, se desagregam com maior facilidade e, através do teste empírico do risco na superfície, se mostram com menor resistência superficial quando comparados com os outros traços.

Em relação a adesão à parede, observou-se que os traços C1A1, C2A1 e C3A1 apresentaram um pequeno descolamento à superfície e algumas trincas nas laterais, em especial na substituição C1A1. Tal fato pode ser atribuído à falta de experiência na atividade exercida pelo operador. Apesar disso, não houveram desplacamentos e desprendimentos dos paineis aplicados. As aplicações, após o período de 28 dias de cura, podem ser observadas na Figura 37, que as exibem frontalmente e lateralmente.

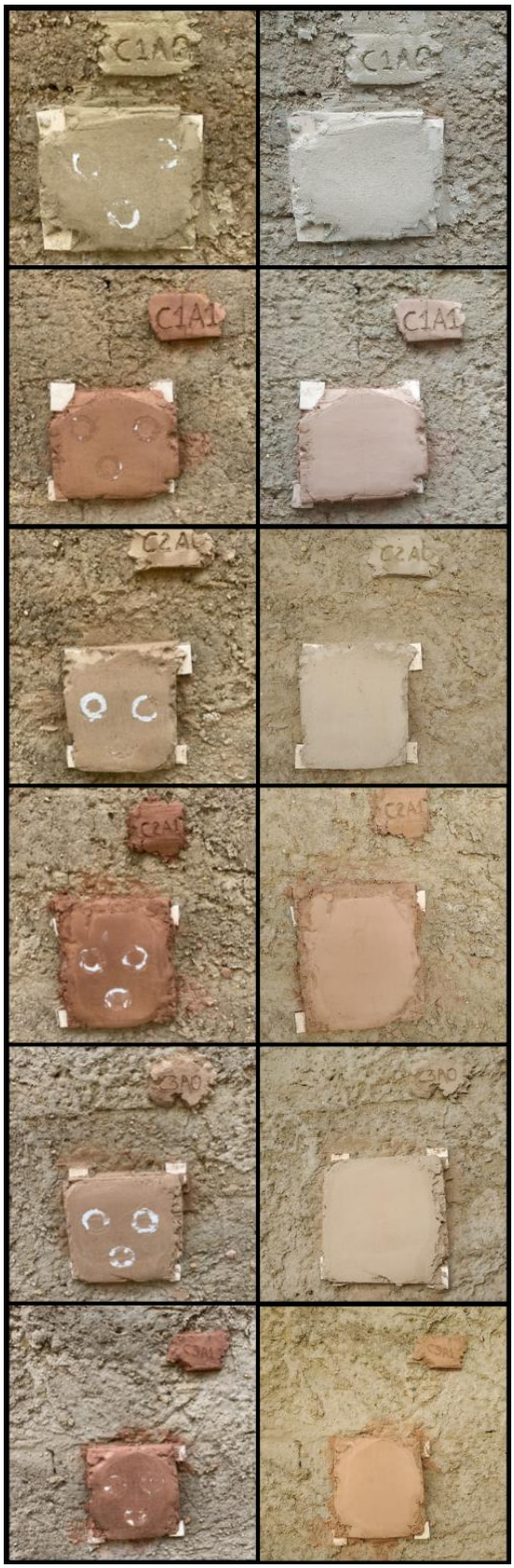
Figura 37 - Aplicação na parede chapiscada



Fonte: Próprio autor

Após um período de aproximadamente 360 dias (354 – 360 dias, uma vez que as aplicações foram realizadas em dias diferentes), as aplicações foram novamente analisadas de forma empírica. A Figura 38 apresenta uma comparação entre as aplicações na parede após 360 dias (à esquerda) e 28 dias (à direita) de aplicação. Nota-se que não houve desplacamentos e desprendimentos durante o período analisado e a mudança de cor se deu devido à umidade e ao grande volume de chuva na época em que foram tiradas as fotografias à esquerda. As formas circulares e brancas apresentadas na foto à esquerda são resíduos do material selante utilizado no teste de permeabilidade.

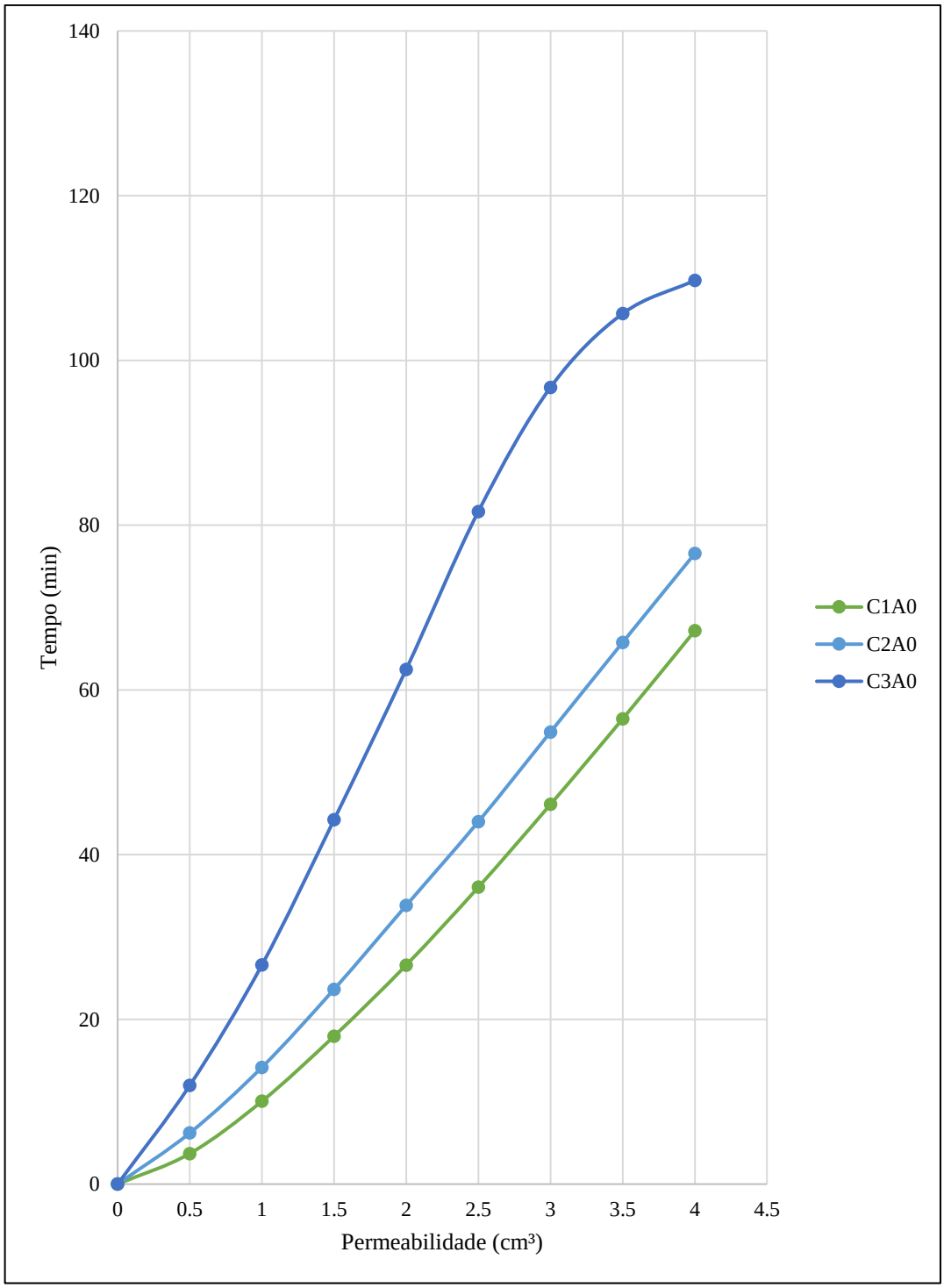
Figura 38 – Comparação da aplicação na parede após 360 dias (esquerda) e 28 dias de cura (direita)



Fonte: Próprio autor

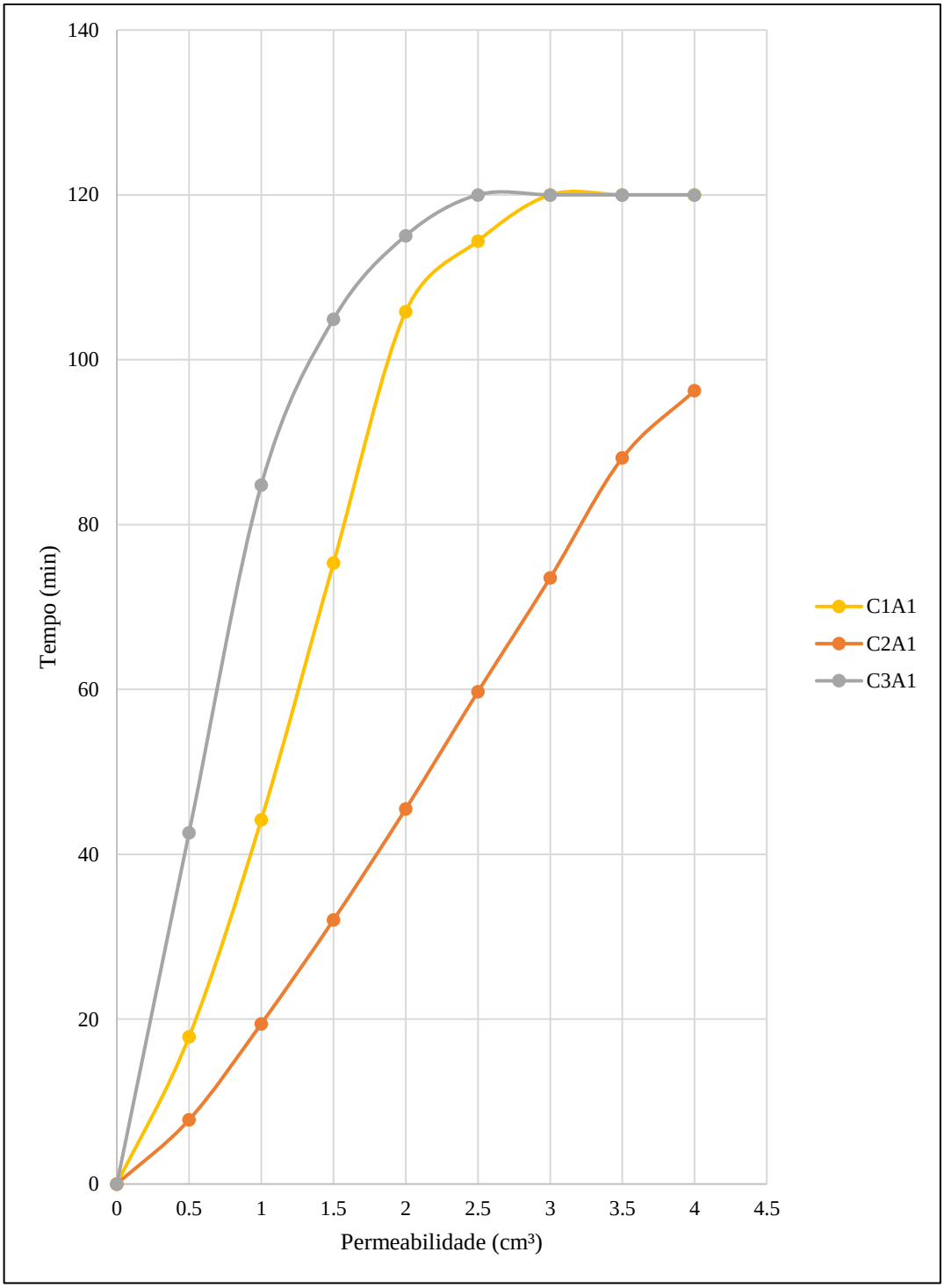
O resultado dos testes de permeabilidade em parede chapiscada para as substituições A0 estão sintetizados na Figura 39. Nota-se que a presença do filito na argamassa melhorou as características de absorção de água em um intervalo de tempo, visto que todas as substituições apresentaram maior tempo de absorção quando comparadas com o traço padrão (C1A0). Assim, o traço C3A0, C2A0 e C1A0 estão listados em ordem decrescente de desempenho no teste. Quanto as substituições A1, C3A1 apresentou melhor desempenho, seguido dos traços C1A1 e C2A1, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 39- Resultado do teste de permeabilidade em parede chapiscada substituição A0



Fonte: Próprio autor

Figura 40 - Resultado do teste de permeabilidade em parede chapiscada substituição A1



Fonte: Próprio autor

4.10 Considerações gerais

Com exceção aos resultados do teste de permeabilidade, os resultados estão sumarizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados sumarizados

	Traço	Relação água/ cimento	Resistência à compressão uniaxial após 28 dias (MPa)	Densidade no estado fresco (Kg/m³)	Densidade no estado endurecido (Kg/m³)	Retenção de água	Teor de ar incorpo-rado
C1A0	1,0:0,64:7,78	1,88	1,40	1877,53	1676,86	81,99%	5,65
C1A1	1,0;0,64;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39	1,88	2,10	1755,06	1716,25	96,18%	10,91
C2A0	1;0,4;0,24;7,78	1,88	1,60	1893,43	1690,33	82,35%	4,85
C2A1	1;0,4;0,24;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39	1,88	2,30	1864,64	1738,12	95,16%	5,35
C3A0	1;0,16;0,48;7,78	1,88	1,50	1943,09	1722,67	83,54%	2,36
C3A1	1;0,16;0,48;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39	1,88	2,20	1945,55	1752,87	95,11%	1,74

A Tabela 9 apresenta a variação em porcentagem dos resultados de cada teste em relação ao traço padrão, tendo os valores obtidos pela argamassa C1A0 como base para a comparação. A partir desta comparação pode-se analisar o rendimento de cada substituição em cada teste. Apesar de não ser indicado comparar diferentes aplicações, a tabela surge como um comparativo geral do desempenho do filito em argamassas, de uma forma geral.

Tabela 9 - Análise dos resultados

	%Filito	Δ Resistência à compressão	Δ Densidade no estado fresco	Δ Densidade no estado endurecido	Δ Retenção de água
C1A1	41,30%	150,00%	93,48%	102,35%	117,31%
C2A0	2,55%	114,29%	100,85%	100,80%	100,45%
C2A1	43,85%	164,29%	99,31%	103,65%	116,07%
C3A0	5,10%	107,14%	103,49%	102,73%	101,90%
C3A1	46,39%	157,14%	103,62%	104,53%	116,00%

5 - CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou analisar o comportamento físico e mecânico de diferentes traços de argamassa com substituições de cal e agregado miúdo em diferentes composições por filito. Buscou-se também soluções práticas para escoar um produto até então tido como estéril de mineração. Cabe enfatizar que até o presente momento o material é disposto em pilhas de estéril.

De forma geral, pode-se dizer que a presença do filito foi vantajosa para a argamassa pelo ponto de vista das propriedades analisadas. Em alguns casos, mesmo apresentando valores menores do que aqueles obtidos para a argamassa padrão, a substituição ainda assim apresentou valores aceitáveis por norma.

A densidade em estado fresco foi afetada de forma heterogênea com o aumento de filito na proporção, analisando os resultados de forma geral. Isso significa que as substituições C1A1 e C2A1 apresentaram valores menores de densidade em estado fresco do que a padrão (C1A0), enquanto as substituições C2A0, C3A0 e C3A1 se mostraram com resultado superior ao padrão. Quanto ao teor de ar incorporado, observa-se um crescimento inverso ao obtido na densidade em estado fresco.

A densidade em estado endurecido teve comportamento homogêneo quando analisado em cada classe de substituição, ou seja, a densidade em estado endurecido aumentou com o aumento do filito na argamassa quando analisadas as substituições da classe A0 (substituição apenas de cal), bem como para as substituições da classe A1 (substituição de agregado miúdo).

A retenção de água mostrou resultados discordantes entre as classes, ou seja, a classe A0 apresentou um aumento gradual com o aumento do filito na composição. Enquanto isso, a classe A1 apresentou uma diminuição da retenção de água com o aumento do filito na composição. Porém, em todas as situações, o valor de retenção de água das substituições foi superior ao encontrado na argamassa padrão.

A resistência à compressão uniaxial apresentou comportamento igual entre as classes. Apesar disso, a classe A1 apresentou valores mais elevados. Quanto às classes, as substituições C2 em ambas classes apresentaram maiores valores, seguidas pelas substituições C3 e, por fim, as substituições C1. Novamente, o valor da argamassa padrão foi inferior às demais.

A permeabilidade não apresentou padrão comportamental, uma vez que os resultados obtidos foram distintos dentro das classes. Apesar disso, a classe A0 apresentou valores mais favoráveis quando comparados aos resultados obtidos pela classe A1.

Por fim, as aplicações na parede tiveram uma grande contribuição para o estudo, visto que foi possível analisar o comportamento das argamassas simulando mais proximamente uma

aplicação real. Além disso, foi possível analisar empiricamente propriedades tais como cor, textura, adesão à parede e aparecimento de trincas.

Em relação as características citadas, pode-se dizer que a classe A1 apresentou melhor comportamento em aplicações em parede chapiscada, uma vez que apresentou maior resistência superficial, textura mais lisa. Além disso, os resultados obtidos pela classe A1 no teste de permeabilidade se mostraram mais vantajosos quando comparados aos obtidos no grupo A0.

De forma geral, pode-se dizer que os traços C1A1 e C2A1 se comportaram de forma favorável quando comparados ao traço padrão (C1A0), uma vez que apresentaram uma redução na densidade em estado fresco, perda de água durante o processo de cura menor (maiores densidades em estado endurecido), um maior resultado nos testes de retenção de água e resistência a compressão uniaxial e maior tempo de absorção no teste de permeabilidade em parede chapiscada.

Vale ressaltar que os testes foram realizados conforme a disponibilidade de recursos e equipamentos. Sugere-se então a realização de testes tais como absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e retração linear, para um maior entendimento do comportamento das argamassas propostas, bem como a aplicação de um incorporador de ar a fim de aprimorar a densidade em estado fresco obtida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. **Panorama do Coprocessamento Brasil 2019**. Disponível em: <www.coprocessamento.org.br>. Acesso em: 21 nov. 2020.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 1 jun. 2011.

ALMEIDA DIAS, L.; CARASEK, H. **Avaliação Da Permeabilidade E Da Absorção Método Do Cachimbo**. SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. São Paulo, p 543-555, 2003

AMARAL, L. F. et al. Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste - A mathematical model approach for granulometric optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119283, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry: C270-14a. In: **Annual Book of ASTM Standards: Chemical-Resistant Nonmetallic Materials; Vitrified Clay Pipe; Concrete Pipe; Fiber-Reinforced Cement Products; Mortars and Grouts; Masonry; Precast Concrete: Designation C270**. Pennsylvania, v. 04.05, 2010.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2014.

ANM. **Informe mineral Julho-Dezembro de 2019**. [s.l: s.n.].

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

ARAUJO, E. R.; FERNANDES, F. R. C. Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. In: **Conflitos Ambientais na Indústria Mineira e Metalúrgica: o passado e o presente**. Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016. p. 65–88.

ARCE, C.; GARZÓN, E.; SÁNCHEZ-SOTO, P. J. Phyllite clays as raw materials replacing cement in mortars: Properties of new impermeabilizing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 348–358, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11172 - Aglomerantes de Origem Mineral. p. 5, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13529 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — TerminologiaAssociação Brasileira de Normas Técnicas**Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14992 - Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas - Requisitos e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressãoAssociação Brasileira de Normas Técnicas**, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporadoAssociação Brasileira de Normas Técnicas**Rio de Janeiro, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13280: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos -**

Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido Rio de Janeiro, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13277 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da retenção de água MortarsAssociação Brasileira de Normas Técnicas**Rio de Janeiro, 2005e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. **Abnt Nbr 45:2006**, p. 18, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação de massa especifica e especifica aparente**Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaiosAssociação Brasileira de Normas Técnicas**, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificação**Rio de Janeiro, 2019.

AZEVEDO, A. R. et al. Development of mortar for laying and coating with pineapple fibers. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 187–193, mar. 2020a.

AZEVEDO, A. R. G. et al. Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 5942–5952, 2020b.

BAAS, L. W. **Cleaner Production and Industrial Ecology; Dynamic Aspects of the Introduction and Dissemination of New Concepts in Industrial Practice**. [s.l.] Erasmus University Rotterdam, 2005.

BANCO DE DADOS - CBIC. **Boletim Estatístico-CBIC**. [s.l: s.n.].

BARBOSA, A. R. Breve panorama da legislação minerária. **Revista de Direito Administrativo**, v. 197, p. 64–73, 1994.

BASTOS, L. A. DE C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

BATATA, C. A. M. A mineração romana no complexo de Tresminas e Jales (Trás-os-Montes, Portugal). n. 1, p. 6–8, 2017.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BLIGHT, G. Mine Waste: A Brief Overview of Origins, Quantities, and Methods of Storage. In: **Waste**. [s.l.] Elsevier Inc., 2011. p. 77–88.

BONZI, R. S. Meio Século de Primavera silenciosa: um livro que mudou o mundo. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 28, p. 207–215, 2013.

BRANCO, R. C. C.; MAÑAS, A. V. **Simbiose industrial no polo industrial de Manaus: uma proposta para o alcance da sustentabilidade ambiental**. Proceedings of the International Conference on Innovation and Management. **Anais**...São Paulo: 2009Disponível em: <https://www.pucsp.br/icim/portugues/downloads/papers/TL_050.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305. . 2 ago. 2010, p. 1–21.

BRASIL. **Sumário Mineral 2017 - Ano base 2016**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <www.anm.gov.br>. Acesso em: 30 out. 2020a.

BRASIL. **Anuário Mineral Estadual - Minas Gerais**BrasíliaAgência Nacional de Mineração, , 2019b.

BRASIL. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas - ano base**

2019. Brasília: [s.n.].

CARASEK, H. Argamassas. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892–944.

CEMBUREAU. Sustainable Cement Production: Co-Processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the European Cement Industry. **Europe**, p. 1–16, 2009.

CETEM. Barragem de Rejeitos. **Tratamento de Minérios**, v. 5ª ed, p. 831–896, 2010.

CHAULYA, S. K.; SINGH, T. N.; SINGH, J. Effects of mine waste disposal on environment and its control. p. 283–291, 1993.

CHERTOW, M. R. **INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.annualreviews.org>. Acesso em: 15 nov. 2020.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. Â.; JOHN, V. M. **Cal na construção civil**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1

COSTA, L. B. **CARACTERIZAÇÃO DE ESTÉRIL FILÍTICO COMO SUBSTITUIÇÃO DE CAL EM ARGAMASSA**. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

COSTA, A. V; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 2, p. 244–259, abr. 2014.

DA SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. [s.l.] UFPR, 2006.

DANTAS, A. A. **Caraterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

DAVENPORT, W. **Extractive Metallurgy of Copper**. 5 ed, p. 455. Amsterdam: Elselvier Ltd, 2011.

DE AZEVEDO, A. R. G. et al. Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 335–346,

2018.

DNPM. **Anuário Mineral Estadual - São PauloDepartamento Nacional de Produção Mineral**. Brasília: 2016.

DNPM. **Anuário Mineral Estadual - Minas GeraisDepartamento Nacional de Produção Mineral**. Brasília: 2017.

ECHEVERRI, J. **Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens**. Distrito Federal: Universidade de Brasília, 2012.

FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração: Ano Base 2017**. Belo Horizonte: FEAM- Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2018.

FIALHO, L. D. S.; SOUZA, L. DE. **Coprocessamento : Vantagens econômicas e ambientais em transformar resíduos sólidos**. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. **Anais**...2015

FIGUEIRÔA, S. F. DE M. Mineração no Brasil: aspectos técnicos e científicos de sua história na colônia e no império (séculos XVIII-XIX). **América Latina en la Historia Económica**, v. 1, n. 01, p. 41, 1994.

FIGUEIRÔA, S. F. DE M. “Metais aos pés do trono”: exploração mineral e o início da investigação da terra no Brasil. **Revista USP**, n. 71, p. 10, 1 nov. 2006.

FONSECA, H. DAS G. DE Á.; ALEXANDRINO, J. S.; FERREIRA, T. E. D. Metodologias de disposição de rejeitos de minério de ferro para substituir as barragens de rejeitos. **Profiscientia**, n. 12, p. 55, 2019.

FONTES, W. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

GERMANY, D. A mineração no Brasil. **Centro de Gestão de estudos Estratégicos, Rio de Janeiro**, p. 60, 2002.

GIL, R. **AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO DO COMPLEXO DE CARAJÁS ATRAVÉS DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS**. Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 25 mar. 2014.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7–20, abr. 2007.

GOLUB, A.; SILVA, C. DA. Influência Do Uso De Materiais Alternativos Em Argamassa De Revestimento Interno: Avaliação Quanto Ao Isolamento Térmico. **Perspectiva**, v. 41, n. 154, p. 111–126, 2017.

HAWLEY, M. CUNNING, J. **Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design**. Autralia: CSIRO Publishing, 2017.

IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 2016.

IBRAM. **Relatório anual de atividades - julho 2018 a junho 2019**. Brasília: IBRAM, 2019.

ICMM. **ROLE OF MINING IN NATIONAL ECONOMIES**. Londres: 2018.

IPEA, I. DE P. E. A. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas - Relatório de Pesquisa. **IPEA (Instituto de PEsquisa Econômica Aplicada)**, p. 1–46, 2012.

LEMOS, M. G. **Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais**. 2011.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, v. 5, n. 1, p. 1, 2016.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo: [s.n.].

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para a sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001.

MARVILA, M. T. et al. Study on the replacement of the hydrated lime by kaolinitic clay in mortars. **Advances in Applied Ceramics**, v. 118, n. 7, p. 373–380, 2019.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N. Verification of the

application potential of the mathematical models of lyse, abrams and molinari in mortars based on cement and lime. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 7327–7334, 2020.

MEHTA, P. K.; MERYMAN, H. Tools for Reducing Carbon Emissions Due to Cement Consumption. **STRUCTURE magazine**, jan. 2009.

MELO, L. G. DE A. et al. Physicochemical characterization of pulverized phyllite rock for geopolymer resin synthesis. **Materials Research**, v. 20, p. 236–243, 2017.

MELO, L. G. DE A.; THAUMATURGO, C. Filito : um material estratégico para fabricação de novos cimentos. p. 10–24, 2012.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. DE A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 303–313, 2002.

MORAIS, I. DE S. **Filito sericítico como material cimentício suplementar**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

MORETO, A. L. R. Características química, mineralógica e tecnológica dos filitos da região de Itapeva-SP empregados na indústria de cerâmica. 2006.

MOTA, J. A. et al. Uma nova proposta de indicadores de sustentabilidade na mineração. **Sustentabilidade em Debate**, v. 8, n. 2, p. 15–29, 1 set. 2017.

MOTTA, J. P. S. P. DA; CARIJÓ, R. DE S. **Simbiose Industrial: um estudo de caso para uma indústria de cosméticos no município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

NAVARRO, R. F. A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2006.

OLIVEIRA, E. M. TRANSFORMAÇÕES NO MUNDO DO TRABALHO, DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL AOS NOSSOS DIAS. **Caminhos de Geografia**, v. 6, n. 11, p. 84–96, 2004.

OLIVEIRA, V. C. H. C. **Estratégias para a minimização da emissão de CO2 de**

concretos estruturais. São Paulo: USP, 2015.

PASSOS, P. N. C. DE. A Conferência de Estocolmo como Ponto de Partida para a Proteção Internacinal do Meio Ambiente. **Revista Direito Fundamentais & Democracia**, v. 6, n. 6, p. 1–25, 2009.

POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. Histórico ambiental: Desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos Avancados**, v. 31, n. 89, p. 271–283, 2017.

RAMOS, E. C. Educação ambiental: origem e perspectivas. **Editora da UFPR 202**, v. 18, p. 201–218, 2001.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa**. 2. ed. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

RIBEIRO, A. P. et al. Caracterização físico-química de filitos brancos da região de Itapeva, SP. **Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, v. 44, p. 1–13, 2000.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. DE F. C.; SANTO, B. C. DO E. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 1–10, 2011.

SANT'ANA FILHO, J. N. DE. **Estudo De Reaproveitamento Dos Resíduos Das Barragens De Minério De Ferro Para Fabricação De Blocos Intertravados De Uso Em Pátios Industriais E Alto Tráfego**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2013.

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTOS, E. P. DOS. Alternativas Para O Tratamento De Ultrafinos De Minério De Ferro Da Mina Do Pico/Mg Por Flotação Em Coluna. p. 114, 2010.

SANTOS, T. G. DOS. **Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2018.

SCHUCHTER, G. P. **Emissão de gases de efeito estufa em reservatórios hidrelétricos**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2010.

SEVERO, C. B. **Aproveitamento de rejeito de minério de ferro para fabricação de**

tijolos cerâmicos. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

SILVA, F. L. DA. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

SILVA, M. L. DA; ANDRADE, M. C. K. Os Impactos Ambientais Da Atividade Mineradora. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 11, n. 6, p. 82, 2017.

SILVEIRA, M. D. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

SOUZA, T. S. A. Evolução histórica da legislação brasileira e do estado de minas gerais relacionado ao tema de disposição de rejeitos de mineração em barragens. p. 94, 2019.

TANIMOTO, A. H. **PROPOSTA DE SIMBIOSE INDUSTRIAL PARA MINIMIZAR OS RESÍDUOS SÓLIDOS NO PÓLO PETROQUÍMICO DE CAMAÇARI**. [s.l.] Universidade Federal da Bahia, 2004.

TEMP, A. L. **Avaliação de revestimentos de argamassa à permeabilidade ao vapor de água**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

TOFFOLO, R. V. M. et al. Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro Technical feasibility of paving concrete elements produced with tailings dam of iron ore como solução final dos resíduos sólidos oriundos. **56° Congresso Brasileiro de Concreto**, n. 1, p. 1–14, 2014.

TREVISAN, M. et al. Ecologia Industrial, Simbiose Industrial e Ecoparque Industrial: conhecer para aplicar. **Sistemas & Gestão**, v. 11, n. 2, p. 204–15, 5 jul. 2016.

UNFCCC CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE A MUDANÇA DO CLIMA. ACM0003: Partial substitution of fossil fuels in cement or quicklime manufacture. **Versão 9.0**, 2020.

VIEIRA, L. C. A formação sete lagoas (grupo Bambuí) e as variações paleoambientas no final do proterozóico. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 574–574, 2008.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **Roadmap Tecnológico do Cimentoto: potencial de**

redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <https://www.dropbox.com/s/9cbtj1c9oquigf8/Roadmap Tecnológico do Cimento_Brasil.pdf?dl=0>. Acesso em: 13 jul. 2021.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction To The Practical Aspects Of Ore Treatment And Mineral Recovery. In: **Wills' Mineral Processing Technology**. 7th. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2006.

XU, S. Research on application of iron tailings on road base. **Advanced Materials Research**, v. 743, p. 54–57, 2013.

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE TRAÇO E MASSAS PARA CADA SUBSTITUIÇÃO

Tabela A. 1 - Relação de traço e massas C1

	C1A0		C1A1	
	Traço	Massa	Traço	Massa
Cimento	1	318,5	1	318,5
Cal	0,64	203,8	0,64	203,84
Areia	7,78	2477,7	3,89	1238,97
Retido 28	0,00	0	1,36	433,16
Retido 48	0,00	0	1,17	372,64
Retido 100	0,00	0	0,97	308,94
Passante 100	0,00	0	0,39	124,21
Passante 200	0,00	0	0	
Soma	9,42	3000	9,42	3000,27
Traço em peso	1,0:0,64:7,78		1,0;0,64;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39	

Tabela A. 2 - Relação de traço e massas C2

	C2A0		C2A1	
	Traço	Massa	Traço	Massa
Cimento	1	318,5	1	318,50
Cal	0,40	127,4	0,4	127,40
Areia	7,78	2477,93	3,89	1238,965
Retido 28	0	0	1,36	433,16
Retido 48	0	0	1,17	372,65
Retido 100	0	0	0,97	308,94
Passante 100	0	0	0,39	124,21
Passante 200	0,24	76,44	0,24	76,44
Soma	9,42	3000,27	9,42	3000,27
Traço em peso	1;0,4;0,24;7,78		1;0,4;0,24;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39	

Tabela A. 3 - Relação de traço e massas C3

	C3A0		C3A1	
	Traço	Massa	Traço	Massa
Cimento	1	318,5	1	318,5
Cal	0,16	50,96	0,16	50,96
Areia	7,78	2477,93	3,89	1238,965
Retido 28	0	0	1,36	433,16
Retido 48	0	0	1,17	372,645
Retido 100	0	0	0,97	308,945
Passante 100	0	0	0,39	124,215
Passante 200	0,48	152,88	0,48	152,88
Soma	9,42	3000,27	9,42	3000,27
Traço em peso	1;0,16;0,48;7,78		1;0,16;0,48;3,89;1,36;1,17;0,97;0,39	

APÊNDICE B – CÁLCULOS

Tabela B. 1 - Cálculo do teste de compressão uniaxial

Resistência a compressão uniaxial (NBR 7215)

		C1A0		
CP	Força Aplicada (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto
1	3140,00	1963,50	1,60	-0,20
2	2810,00	1963,50	1,43	0,00
3	2670,00	1963,50	1,36	0,00
4	3030,00	1963,50	1,54	-0,10
5	2590,00	1963,50	1,32	0,10
6	2830,00	1963,50	1,44	0,00
		Média	1,40	
		C1A1		
CP	Força Aplicada (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto
1	4070,00	1963,50	2,07	0,00
2	4090,00	1963,50	2,08	0,00
3	4350,00	1963,50	2,22	-0,10
4	4830,00	1963,50	2,46	-0,40
5	4390,00	1963,50	2,24	-0,10
6	3200,00	1963,50	1,63	0,50
		Média	2,10	
		C2A0		
CP	Força Aplicada (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto
1	3480,00	1963,50	1,77	-0,20
2	3310,00	1963,50	1,69	-0,10
3	2890,00	1963,50	1,47	0,10
4	3110,00	1963,50	1,58	0,00
5	2830,00	1963,50	1,44	0,20
6	2800,00	1963,50	1,43	0,20
		Média	1,60	
		C2A1		
CP	Força Aplicada (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto
1	5090,00	1963,50	2,60	-0,30
2	4690,00	1963,50	2,39	-0,10
3	4650,00	1963,50	2,37	-0,10
4	4390,00	1963,50	2,24	0,10
5	4340,00	1963,50	2,21	0,10
6	4160,00	1963,50	2,12	0,20
		Média	2,30	

C3A0				
CP	Força Aplicada (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto
1	3300,00	1963,50	1,68	-0,20
2	2990,00	1963,50	1,52	0,00
3	2670,00	1963,50	1,36	0,10
4	2840,00	1963,50	1,45	0,10
5	3200,00	1963,50	1,63	-0,10
6	3170,00	1963,50	1,61	-0,10
		Média	1,50	
C3A1				
CP	Força Aplicada (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto
1	4000,00	1963,50	2,04	0,20
2	4270,00	1963,50	2,18	0,00
3	4300,00	1963,50	2,19	0,00
4	4590,00	1963,50	2,34	-0,10
5	4420,00	1963,50	2,25	-0,10
6	4420,00	1963,50	2,25	-0,10
		Média	2,20	

Tabela B. 2 - Cálculo do teste de permeabilidade em blocos

Permeabilidade (NBR 14992:2003 – anexo G)

C1A0				
Absorção (c)	CP			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	3,00	3,23	3,53	3,26
3,5	8,00	7,72	7,85	7,86
C1A1				
Absorção (c)	CP			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	8,00	2,73	9,50	6,75
3,5	21,63	8,33	23,95	17,97
C2A0				
Absorção (c)	CP			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	2,47	2,85	3,63	2,98
3,5	6,00	6,80	8,05	6,95

C2A1

Absorção (c)	CP			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	3,50	2,63	4,00	3,38
3,5	11,02	8,27	12,00	10,43

C3A0

Absorção (c)	CP			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	2,25	3,00	2,48	2,58
3,5	6,25	7,33	5,90	6,49

C3A1

Absorção (c)	CP			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	3,50	3,50	3,50	3,50
3,5	12,00	12,00	12,00	12,00

Tabela B. 3 - Cálculo do teste de densidade em estado endurecido

Densidade em estado endurecido (NBR 13280)

C1A0				**C1A1**			
Teste	Volume	Massa	Densidade (kg/m³)	Teste	Volume	Massa	Densidade (kg/m³)
1	195290,40	328,85	1683,90	1	195823,40	338,14	1726,76
2	195746,50	328,72	1679,31	2	197008,50	338,78	1719,62
3	195883,50	329,43	1681,77	3	197215,90	341,31	1730,64
4	196240,10	330,50	1684,16	4	199671,20	343,38	1719,73
5	196624,40	326,67	1661,39	5	198131,30	342,10	1726,63
6	196094,40	327,60	1670,62	6	206631,20	345,92	1674,10
		Média	1676,86			**Média**	1716,25
C2A0				**C2A1**			
Teste	Volume	Massa	Densidade (kg/m³)	Teste	Volume	Massa	Densidade (kg/m³)
1	194828,30	332,35	1705,86	1	196930,10	344,44	1749,05
2	201047,70	341,80	1700,09	2	197833,80	340,83	1722,81
3	195805,60	329,52	1682,89	3	198434,40	344,15	1734,33
4	195789,00	331,45	1692,89	4	197023,70	343,35	1742,68
5	195879,90	329,13	1680,26	5	197895,70	344,49	1740,76
6	197970,20	332,58	1679,95	6	198498,10	345,20	1739,06
		Média	1690,33			**Média**	1738,11

	C3A0				C3A1		
Teste	Volume	Massa	Densidade (kg/m³)	Teste	Volume	Massa	Densidade (kg/m³)
1	195079,90	338,30	1734,16	1	201178,00	352,55	1752,43
2	201702,10	346,46	1717,68	2	194770,10	343,51	1763,67
3	195571,00	335,94	1717,74	3	196170,60	343,87	1752,91
4	195563,60	336,94	1722,92	4	197284,90	343,88	1743,06
5	201297,00	344,01	1708,97	5	196457,30	343,90	1750,51
6	195684,30	339,42	1734,53	6	195362,20	342,79	1754,64
		Média	1722,67			**Média**	1752,87

Tabela B. 4 - Cálculo do teste de retenção de água

Retenção de água (NBR 13277)

Teste	**Massa funil úmido**	**Massa funil + argamassa**	**Massa funil + argamassa (sucção)**	**Fator água/argamassa**	**Retenção de água**
C1A0	782,81	1985,79	1948,95	0,17	81,99%
C1A1	782,57	2032,97	2024,85	0,17	96,18%
C2A0	782,83	1997,06	1960,63	0,17	82,35%
C2A1	782,35	2078,47	2067,80	0,17	95,16%
C3A0	783,04	2013,94	1979,50	0,17	83,54%
C3A1	783,76	2040,80	2030,34	0,17	95,11%

Tabela B. 5 - Cálculo do teste de permeabilidade em parede

Permeabilidade (NBR 14992:2003 – anexo G)

C1A0				
Permeabilidade (cm³)	Tempo (min)			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	4,45	5,18	1,50	3,71
1	11,57	14,67	3,93	10,06
1,5	20,02	25,50	8,37	17,96
2	29,10	37,17	13,50	26,59
2,5	38,47	49,45	20,22	36,05
3	48,40	62,17	27,73	46,10
3,5	58,52	75,42	35,50	56,48
4	68,12	89,27	44,13	67,17

C1A1

Permeabilidade (cm³)	Tempo (min)			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	16,77	17,07	19,75	17,86
1	47,57	43,62	41,38	44,19
1,5	89,05	75,87	61,13	75,35
2	120,00	110,17	87,33	105,83
2,5	120,00	120,00	103,22	114,41
3	120,00	120,00	120,00	120,00
3,5	120,00	120,00	120,00	120,00
4	120,00	120,00	120,00	120,00

C2A0

Permeabilidade (cm³)	Tempo (min)			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	6,02	7,43	5,17	6,21
1	15,17	15,78	11,58	14,18
1,5	25,43	25,85	19,68	23,65
2	36,50	36,67	28,32	33,83
2,5	47,57	46,93	37,50	44,00
3	59,88	57,63	47,15	54,89
3,5	71,78	68,82	56,70	65,77
4	83,38	80,17	66,10	76,55

C2A1

Permeabilidade (cm³)	Tempo (min)			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	9,02	6,22	8,12	7,79
1	24,80	16,07	17,45	19,44
1,5	41,77	26,93	27,40	32,03
2	60,00	38,73	37,78	45,50
2,5	78,83	51,82	48,50	59,72
3	97,82	65,10	57,68	73,53
3,5	117,63	79,17	67,47	88,09
4	120,00	91,92	76,83	96,25

C3A0

Permeabilidade (cm³)	Tempo (min)			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	11,10	16,53	8,33	11,99
1	26,78	36,00	17,02	26,60
1,5	45,67	59,30	27,73	44,23
2	64,67	84,43	38,38	62,49
2,5	85,78	108,08	51,12	81,66
3	106,73	120,00	63,45	96,73
3,5	120,00	120,00	77,03	105,68
4	120,00	120,00	89,12	109,71

C3A1

Permeabilidade (cm³)	Tempo (min)			
	1	2	3	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	30,50	75,50	21,85	42,62
1	84,57	120,00	49,83	84,80
1,5	120,00	120,00	74,75	104,92
2	120,00	120,00	105,15	115,05
2,5	120,00	120,00	120,00	120,00
3	120,00	120,00	120,00	120,00
3,5	120,00	120,00	120,00	120,00
4	120,00	120,00	120,00	120,00

Tabela B. 6 - Cálculo do teste de densidade em estado fresco

Densidade em estado fresco (NBR 13278)

Teste	Massa recipiente vazio + placa (g)	Massa recipiente + água + placa (g)	Volume recipiente (cm³)	Massa recipente + argamassa + placa (g)	Densidade (kg/m³)	Densidade teórica (g/cm³)	Teor de ar
C1A0	500,10	954,82	454,72	1353,85	1877,53	1,99	5,65
C1A1	500,10	954,82	454,72	1298,16	1755,06	1,97	10,91
C2A0	500,10	954,82	454,72	1361,08	1893,43	1,99	4,85
C2A1	500.10	954.82	454.72	1347,99	1864,64	1,97	5,35
C3A0	500,10	954,82	454,72	1383,66	1943,09	1,99	2,36
C3A1	500,10	954,82	454,72	1384,78	1945,55	1,98	1,74