



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

LAURA BORGES COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DE ESTÉRIL FILÍTICO COMO
SUBSTITUIÇÃO DE CAL EM ARGAMASSA**

ARAXÁ/MG

2019

LAURA BORGES COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DE ESTÉRIL FILÍTICO COMO
SUBSTITUIÇÃO DE CAL EM ARGAMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Fábio de São José

Coorientador: Prof. Me. Francisco de Castro Valente Neto

ARAXÁ/MG

2019

LAURA BORGES COSTA

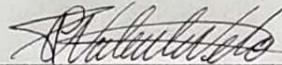
CARACTERIZAÇÃO DE ESTÉRIL FILÍTICO COMO SUBSTITUIÇÃO DE CAL EM ARGAMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas

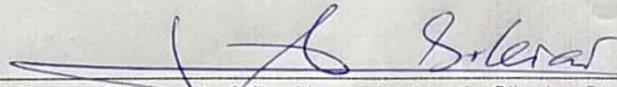
Araxá, 27 de junho de 2019



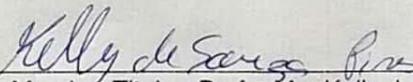
Presidente e Orientador: Prof. Me. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular e Coorientador: Prof. Especialista Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Profa. Me. Kelly de Souza Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICO ESTE TRABALHO

Aos meus pais, Delmo e Júnia, que não pouparam esforços para que esse sonho fosse realizado. Essa vitória é nossa!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Júnia e Delmo, que nunca me deram qualquer ideia de que eu não poderia fazer ou ser o que quisesse. Obrigada por todo amor e carinho e por estarem sempre comigo, acreditando e dando apoio. Vocês são a minha maior inspiração.

Ao meu irmão, Fred, que nunca mediu esforços para me auxiliar quando os conceitos de Engenharia Civil se fizeram presentes neste trabalho. Obrigada pela paciência, ajuda e compreensão. Você foi essencial para que esse trabalho pudesse ser concluído.

Ao meu orientador, Professor Me. Fábio de São José por toda a compreensão e apoio, por todo o conhecimento transmitido e por ser sempre tão acessível e atencioso nos momentos em que precisei.

À Mineração Dornas LTDA., em especial ao Rogério Bustamante, por ceder as amostras utilizadas, bem como todo apoio para que o trabalho fosse realizado, a oportunidade de estágio e todos os aprendizados adquiridos.

Ao Professor Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez pelo apoio e auxílio nos testes laboratoriais. A você toda minha admiração e gratidão.

Aos meus amigos, em especial Ana Cláudia, Morgana e Cecília, que estiveram sempre ao meu lado durante a realização do trabalho.

Por fim, agradeço a Deus porque sem Ele nada disso seria possível.

RESUMO

O Brasil é um país com abundância de rochas filíticas e, por isso, apresentam simples exploração e beneficiamento. Em relação à aplicabilidade, a rocha é muito utilizada na indústria de cerâmicas e construção civil. Na mina de calcário da empresa Mineração Dornas Ltda., no município de Santa Rosa da Serra, MG, o filito é o estéril retirado e empilhado para lavra do minério de calcário. Visto isso, o presente trabalho aborda a caracterização do filito dessa mina, bem como apresenta uma proposta de aplicação como substituinte de cal em argamassas de revestimento. Para isso foram realizadas três substituições, denominadas F0, sem a presença de filito, F50, com 50% de filito na constituição e F75, com 75% de filito, que resultaram em aumento na resistência à compressão uniaxial de cerca de 14,4% para o F50 e de 30,7% para o F75. A caracterização tecnológica apontou os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e os minerais quartzo, mica (fengita) e caulinita como principais constituintes, o que permitiu classificar o filito como alumino silicato de ferro. Além disso, pelas análises térmicas, nota-se ganhos de massa pela dessorção de água da superfície das partículas e pela desidroxilação da caulinita, se transformando em metacaulinita, bem como um evento exotérmico. Portanto, com relação aos aspectos químicos e físicos a substituição do filito se mostra favorável. No aspecto ambiental, seu uso se mostra ainda mais favorável, por viabilizar o aproveitamento de um estéril, dando valor econômico ao filito dessa mina.

Palavras-chave: Filito. Argamassa. Aproveitamento de estéril. Caracterização tecnológica.

ABSTRACT

Brazil is a country with abundance of phyllite rocks and, therefore, present simple exploitation and beneficiation. In relation to applicability, the rock is widely used in ceramic industry and in construction. In the limestone mine of the company Mineração Dornas Ltda. in the municipality of Santa Rosa da Serra, MG, the phyllite is the sterile removed and piled up for the mining of limestone. Given this, the present work deals with the characterization of the material, as well as the proposal of application as a substitute for lime in coating mortars. For this, three substitutions were made, called F0, without the presence of phyllite, F50, with 50% of phyllite in the constitution and F75, with 75% of phyllite, which resulted in an increase in the uniaxial compression resistance of about 14.4% for the F50 and 30.7% for the F75. The technological characterization showed the SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oxides and the minerals quartz, mica (fengite) and kaolinite as main constituents, which allowed to classify the phyllite as alumino iron silicate. In addition, by the thermal analysis, mass gains are observed by the desorption of water from the surface of the particles and the dehydroxylation of kaolinite, transforming into metacaulinite, as well as an exothermic event. Therefore, due to the chemical and physical aspects, the substitution of the phyllite is favorable. In the environmental aspect, the use of these material is even more favorable, for making feasible the use of a sterile, giving economic value to the phyllite of this mine.

Keywords: Phyllite. Mortar. Exploitation of sterile. Technological characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do empreendimento mineiro, adaptado de Google Earth, 2018.	18
Figura 2 - Imagem de satélite da Fazenda Pedras, adaptado de Instituto Estadual de Florestas, 2017.	19
Figura 3 - Filito sobre calcário.	19
Figura 4 - Situação da Folha Luz em relação ao Cráton do São Francisco, adaptado de KUCHENBECKER e PEDROSA-SOARES, 2013.	20
Figura 5 - Modelo de fluxograma para caracterização tecnológica de minérios, adaptado de Neumann <i>et al.</i> , 2004.	23
Figura 6 - Classificação da argamassa, adaptado de Carasek, 2007.	31
Figura 7 - Fluxograma da etapa de caracterização	36
Figura 8 - Material úmido.	37
Figura 9 - Pré-classificação do material	38
Figura 10 - Pilha cônica.	38
Figura 11 – Sequência de quarteamento.	39
Figura 12 - Pilha alongada.	39
Figura 13 - Sequência da britagem.	43
Figura 14 - Sequência de moagem	43
Figura 15 - Classificação em peneira de 200#.	44
Figura 16 - Procedimento para cálculo da densidade aparente	44
Figura 17 - Sequência de determinação da massa unitária da areia	45
Figura 18 – Misturador.	47
Figura 19 - Prensa hidráulica de acionamento elétrico.	48
Figura 20 - Amostra final	49
Figura 21 - Difratoograma de raios X da amostra filito.	52
Figura 22 – Curvas análises térmicas TGA e DTA	53
Figura 23 - Análises térmicas, adaptado de Morais <i>et al.</i> (2018).	54
Figura 24 - Corpos de prova após um (acima) e 28 (abaixo) dias de cura	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reservas minerais.....	16
Tabela 2 - Quantidade e valor da produção mineral comercializada	16
Tabela 3 - Porte e modalidade de lavra das minas	17
Tabela 4 - Porte das usinas	17
Tabela 5 - Composição ideal do cimento Portland.....	26
Tabela 6 - Tipos de cimento Portland.....	27
Tabela 7 - Requisitos químicos	28
Tabela 8 - Requisitos físicos e mecânicos	28
Tabela 9 - Requisitos químicos	34
Tabela 10 - Requisitos físicos.....	35
Tabela 11 - Peso das alíquotas.....	50
Tabela 12 - Análises químicas (%).....	51
Tabela 13 - Resultados Densidades Aparentes.....	55
Tabela 14 - Resultados Densidades Aparentes Misturas.....	56
Tabela 15 - Resultados do teste de compressão	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASE	Área Superficial Específica
B.E.T.	(Brunauer, Emmett e Teller) Adsorção de Nitrogênio
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratometria de Raios X
DTA	Análise térmica diferencial
FRX	Fluorescência de Raio-X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PPC	Perda ao Fogo Por Calcinação
ROM	Run of Mine
TGA	Análises Termogravimétricas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Filito	15
2.2. Contexto Geológico	17
2.3. Pilha de estéril	20
2.4. Caracterização Tecnológica	22
2.4.1. Fracionamento da amostra	23
2.4.2. Identificação das fases	24
2.4.3. Quantificação dos minerais	25
2.4.4. Determinação de área superficial específica (B.E.T.)	25
2.5. Cimento Portland	26
2.6. Agregado miúdo	29
2.7. Cal	29
2.8. Argamassa	30
2.9. Materiais Pozolânicos	34
3. METODOLOGIA	36
3.1. Caracterização Tecnológica	36
3.1.1. Amostragem	37
3.1.2. Umidade	40
3.1.3. Massa Específica	40
3.1.4. Análise Química	41
3.1.5. Análise Mineralógica	41
3.1.6. Análises termogravimétricas (TG)	41
3.1.7. Área superficial específica (B.E.T.)	42

3.2.	Aproveitamento de estéril para produção de argamassa	42
3.2.1.	Corpos de prova.....	46
3.2.2.	Ensaio de compressão.....	47
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1.	Caracterização Tecnológica	49
4.1.1.	Amostragem	49
4.1.2.	Umidade.....	50
4.1.3.	Massa Específica	50
4.1.4.	Análise Química	51
4.1.5.	Análise Mineralógica.....	51
4.1.6.	Análises termogravimétricas (TG).....	52
4.1.7.	Área superficial específica (B.E.T.).....	54
4.2.	Aproveitamento de estéril para produção de argamassa	55
4.2.1.	Corpos de prova.....	55
4.2.2.	Ensaio de compressão.....	57
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXO A – Folha Luz	65
	ANEXO B – Gráfico B.E.T.....	66

1. INTRODUÇÃO

Filito é uma rocha metamórfica de baixo grau metamórfico, de granulação muito fina (pelítica), composta basicamente por micas, caulinita, clorita, quartzo e feldspatos. Seu nome deriva do grego *phýllon*, que significa “rocha foliada”. Apresenta estrutura foliada, além de brilho lustroso ou sedoso. De acordo com sua concentração mineralógica, apresenta diversas colorações, dentre elas branco, creme, rosado, roxo, cinza e preto. É uma rocha intermediária entre a ardósia e xisto na evolução metamórfica de pelitos, por isso possui características e propriedades de ambas. (Ribeiro *et al.*, 2000)

Por ser uma rocha abundante no Brasil e de simples rota de exploração e beneficiamento, o que resulta em um baixo valor agregado do minério, o filito vem sendo empregado na indústria cerâmica como substituto parcial das argilas brancas e caulim, na indústria de construção civil na integração de argamassas em assentamentos, emboço e reboco, como carga de ração animal, adubos, sal mineral, borrachas e refratários (MELO e THAUMATURGO, 2012).

Sua composição e textura variam entre jazidas e até mesmo dentro de uma mesma reserva. Essa variabilidade confere características próprias a cada minério. Surge, a partir disso, a necessidade de caracterizar tecnologicamente o minério, a fim de conhecer suas propriedades de interesse.

Os estudos de caracterização tecnológica têm como finalidade analisar a exequibilidade técnica de processamento de um minério, ou seja, técnicas que visam preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alterar essencialmente a constituição química os minerais, bem como otimizar os mesmos métodos e assim apontar informações necessárias para o desenvolvimento de uma rota do processo. Além disso, outro propósito é definir aplicações industriais, tendo em vista as características do material estudado. Esses são, em linhas gerais, os objetivos propostos para esse trabalho, tendo em foco o filito que até então é considerado estéril na mina de calcário do município de Santa Rosa da Serra - MG.

Para que o calcário, produto principal da mina, seja lavrado, é necessário que a lente de filito encontrada acima do minério seja retirada. O material retirado é disposto em estruturas

denominadas pilhas de estéril. Essas são estruturas que surgem devido à necessidade de realocação do estéril para que a rocha industrial (calcário) seja lavrada. Tal deslocamento de material resulta em um aumento no custo operacional da mina (ZYL, 1993). A fim de minimizar os custos, eram adotadas estruturas simples, comumente denominadas de “bota-fora”, que resultam em impactos ambientais consideráveis (NUNES, 2014). Devido aos numerosos acidentes resultantes da metodologia de construção das pilhas de estéril e da responsabilidade ambiental, o trabalho de planejamento e o projeto de uma pilha de estéril se tornaram mais rigorosos (ARAGÃO, 2008).

Tendo em vista todos os impactos associados à disposição de estéril em pilhas, fica evidenciado, mais uma vez, a importância da caracterização da rocha filítica, a fim de propor uma utilização do material.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item apresenta uma revisão da literatura relacionando conceitos para uma melhor compreensão do tema abordado.

2.1. Filito

Filito é uma rocha metamórfica, formada a partir de metamorfismo regional de baixo grau em rochas pelíticas, foliada, com grau elevado de orientação, composta basicamente por quartzo, sericita, caulinita e clorita, porém pode apresentar minerais acessórios como o zircão, magnetita, hematita, ilmenita, rutilo, turmalina, grafita, pirita, epidoto, albita e cloritoide (LEMOS, 2011). Cristais minúsculos de grafita, sericita e clorita conferem a rocha um brilho sedoso nas superfícies de clivagem. Na classificação conforme o grau metamórfico, o filito se encontra entre a ardósia e o xisto e tem como protólito, ou seja, rocha mãe, a ardósia (WINGE, 1996).

Os minerais constituintes são maiores que os da ardósia, apesar de ser uma rocha de granulação fina, porém não são visíveis a olho nu. Esses constituintes são, no entanto, identificáveis no microscópio. Essas características definem, de acordo com Juliani e Szabó (2002), uma foliação denominada foliação filítica, do inglês *phyllitic foliation*.

Bertolino *et al.* (2009) complementam dizendo que o destino da rocha é restrito a agregados para construção civil, uma vez que a ausência de bandamentos e a presença de finas lâminas conferem ao material uma maior fragilidade.

Os valores em tonelada da reserva medida, indicada, inferida e lavrável do filito no estado de Minas Gerais, nos anos de 2010 a 2014 se encontram na Tabela 1, de acordo com o DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, atual Agência Nacional de Mineração (ANM). A diferença entre os tipos de reserva é o grau de confiabilidade com que características como teor, volume, conteúdo mineral etc. são determinados. O artigo 26 do Regulamento do Código de Mineração define reserva medida, indicada e inferida. Na reserva medida, as características da mesma são estabelecidas com elevado nível de confiabilidade e erro de até 20%. Já na reserva indicada, as estimativas realizadas são confiáveis e erro de até

40%. Enquanto isso, na reserva inferida o nível de confiabilidade é baixo e o erro pode ser superior a 40%. É dita como lavrável uma reserva cuja exploração se comprova economicamente e tecnicamente viável.

Tabela 1 - Reservas minerais

	Reserva (t)			
	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
2010	43.286.760	69.988.782	69.041.667	50.851.581
2011	43.922.118	71.383.390	69.635.943	40.703.498
2012	46.145.302	71.383.390	69.635.943	52.467.157
2013	53.064.974	88.235.766	73.054.548	59.708.456
2014	57.940.373	88.235.766	72.615.792	63.164.386

Fonte: Adaptado de BRASIL, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2017.

A produção bruta e beneficiada em tonelada, bem como os valores bruto, beneficiado e total de filito em Minas Gerais nos anos de 2010 a 2014 estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade e valor da produção mineral comercializada

	Produção Bruta		Produção Beneficiada		Valor
	Quantidade (t)	Valor (R\$)	Quantidade (t)	Valor (R\$)	Total (R\$)
2010	25.787	114.615	178.535	9.194.219	9.308.834
2011	64.860	977.828	165.378	9.972.803	10.950.631
2012	88.898	2.343.834	92.146	9.024.665	10.368.499
2013	104.706	3.531.069	108.875	9.957.918	13.488.988
2014	130.486	3.630.843	106.314	9.376.721	13.007.565

Fonte: Adaptado de BRASIL, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2017.

Nas Tabela 3 e Tabela 4 está representado o porte das indústrias mineradoras e das usinas beneficiadoras de filito no estado de Minas Gerais nos anos de 2010 a 2014, onde é

considerado de grande porte quando a produção máxima bruta (ROM) ou de produto beneficiado produzido é maior que 1.000.000 t/ano. Para empresas de médio porte, esse valor está entre 100.000 t/ano e 1.000.000 t/ano. Já as de pequeno porte tem valor entre 10.000 t/ano até 100.000 t/ano, enquanto as consideradas micro porte produzem abaixo de 10.000 t/ano.

Tabela 3 - Porte e modalidade de lavra das minas

	Grande	Médio	Pequeno	Micro	Total
2010	0	1	3	0	4
2011	0	1	2	2	5
2012	0	1	3	5	9
2013	0	0	7	6	13
2014	0	0	7	9	16

Fonte: Adaptado de BRASIL, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2017.

Tabela 4 - Porte das usinas

	Grande	Médio	Pequeno	Micro	Total
2010	0	1	3	3	7
2011	0	1	4	6	11
2012	0	0	3	1	4
2013	0	0	4	1	5
2014	0	0	4	0	4

Fonte: Adaptado de BRASIL, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2017.

2.2. Contexto Geológico

O filito em estudo está localizado na Fazenda Pedras, delimitada pelas coordenadas geográficas 19°35'55.22" S e 46°03'31.99" W, a 5 km do município de Santa Rosa da Serra, região centro-oeste de Minas Gerais. A empresa responsável pela exploração e depósito do filito é a Dornas Mineração Ltda, que atua no ramo de mineração desde 2008. Seu produto principal é a brita,

obtida através da exploração de rochas calcárias calcíticas. A localização do empreendimento mineiro está representada na Figura 1 **Error! Reference source not found.**

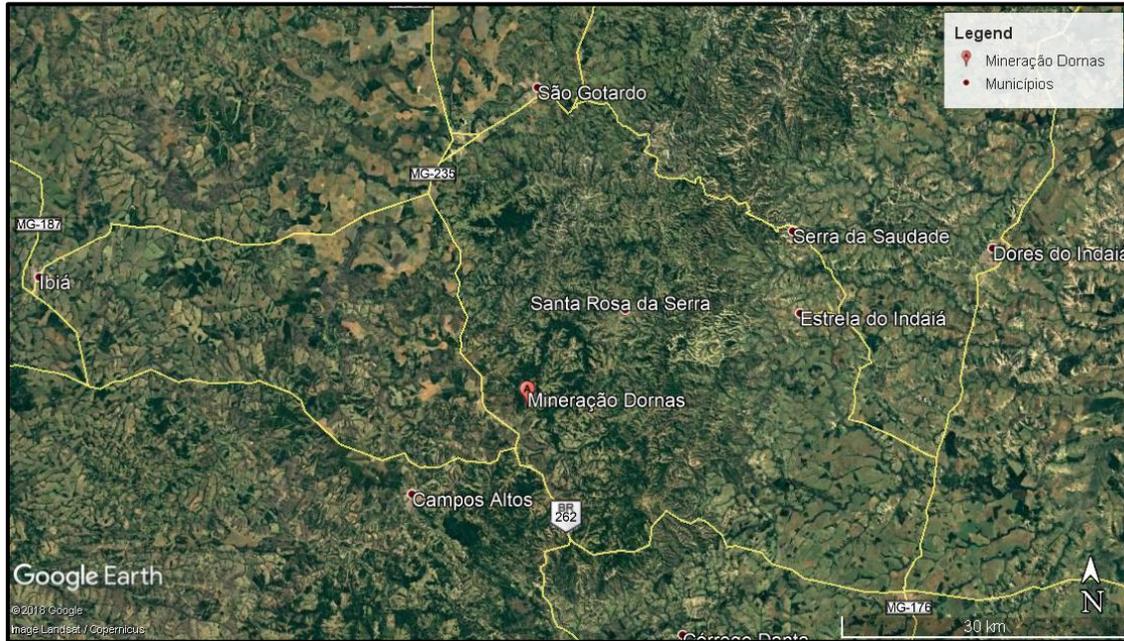


Figura 1 - Localização do empreendimento mineiro, adaptado de Google Earth, 2018.

Na Figura 2, está representada a Fazenda Pedras, onde a área atual da mina e frentes de lavra estão representadas pelos polígonos em vermelho, a reserva legal da propriedade pelo polígono em verde e as áreas de compensação florestal pelos polígonos em azul. A Figura 3 mostra a lente de filito sobre o calcário.

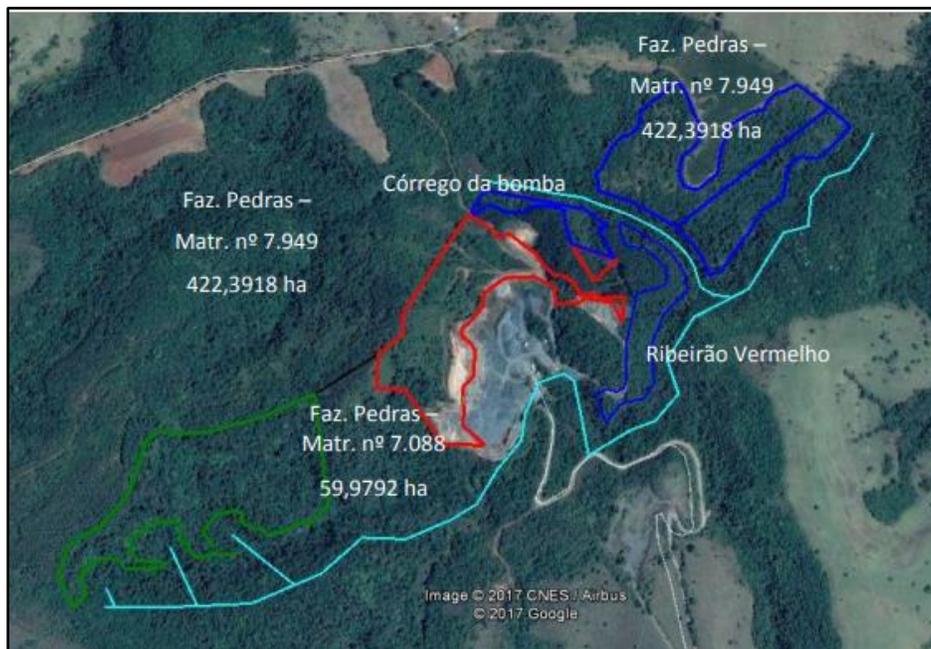


Figura 2 - Imagem de satélite da Fazenda Pedras, adaptado de Instituto Estadual de Florestas, 2017.



Figura 3 - Filito sobre calcário.

A região está inserida nos domínios do Cráton do São Francisco, em sua borda oeste, onde predominam rochas sedimentares neoproterozóicas pertencentes ao Grupo Bambuí, podendo ocorrer também rochas sedimentares e ígneas de idade cretácica, bem como cobertura

cenozóica. A área está representada na Folha Luz (SE-23-YD-V), em Anexo A, numa escala de 1:100000.

Na Figura 4 está representada a situação da Folha Luz em relação ao Crátão do São Francisco. A região I representa o Embasamento com idade maior que 1.8 Ga. Em II, ilustra a Bacia do São Francisco, e em III, a Cobertura Fanerozoica.

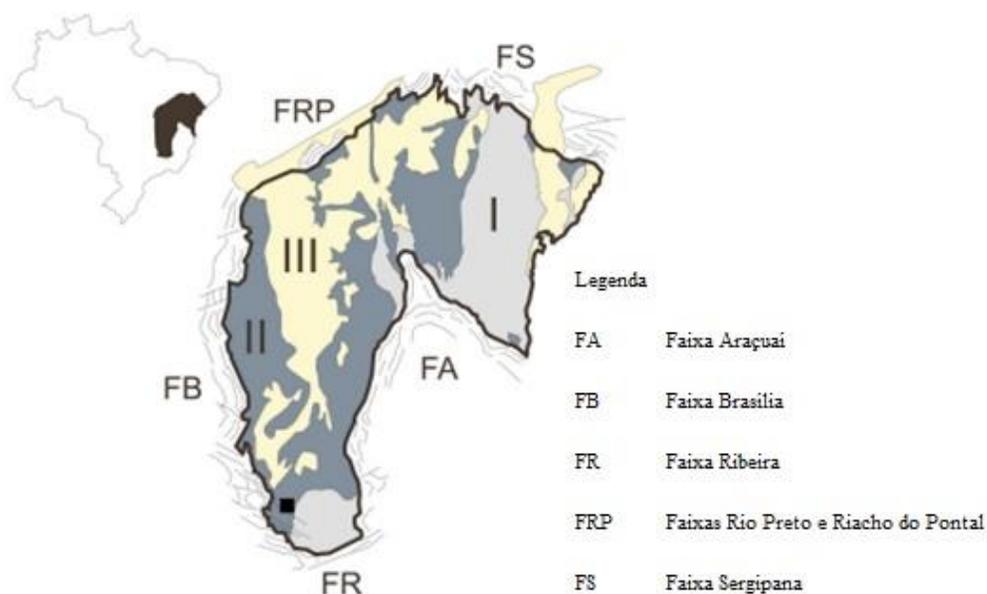


Figura 4 - Situação da Folha Luz em relação ao Crátão do São Francisco, adaptado de KUCHENBECKER e PEDROSA-SOARES, 2013.

As rochas do Grupo Bambuí, em especial de áreas mais a sul, são predominantemente calcárias. Na região de Luz, porém, há uma dominância de rochas pelíticas, ficando os carbonatos restritos a lentes de dimensões variadas.

2.3. Pilha de estéril

É denominado estéril o material não processado que não possui valor econômico agregado, proveniente da etapa de lavra, especialmente do processo de decapeamento de jazidas a fim

de permitir o acesso ao corpo mineral. Solo, subsolo e rochas de naturezas diversas fazem parte desta classificação (SILVA, 2006). O material escavado é então transportado por caminhões e depositados geralmente na forma de pilhas construídas a partir de sucessivos alteamentos (PETRONILHO, 2010).

Essas estruturas são denominadas pilhas de estéril e, por serem constituídas de materiais heterogêneos e de granulometria diversa, apresentam elevado grau de complexidade e demandam grandes áreas. Dentre os impactos gerados pela construção das pilhas de estéril destacam-se os impactos econômicos, de segurança e ambientais (PETRONILHO, 2010).

Devido aos numerosos acidentes resultantes da metodologia de construção das pilhas de estéril e da responsabilidade ambiental, o trabalho de planejamento e o projeto de uma pilha de estéril se tornaram mais rigorosos (ARAGÃO, 2008).

Por se tratar de um material sem valor econômico, o deslocamento de material resulta em um aumento no custo operacional da mina (ZYL, 1993). Surge então estruturas denominadas “bota-fora”, que visam minimizar os custos de operação e simplificar o processo de construção das estruturas (NUNES, 2014).

Por se tratar de um material desagregado, as estruturas geotécnicas apresentam elevada preocupação em relação a segurança. É requerido um fator de segurança de estabilidade física maior ou igual a 1,5. Variabilidade granulométrica, ausência de compactação, falhas geológicas na fundação, presença de água em excesso, altura e ângulo de talude excessivo, má construção da estrutura são aspectos que podem resultar em um colapso da estrutura (NUNES, 2014).

Em relação aos impactos ambientais associados, deve-se levar em consideração primeiramente o local escolhido para destinação do material, a fim de garantir que a área não pertença a uma área de preservação ambiental (parques, reservas ecológicas, sítio arqueológico ou histórico, nascente de bacia hidrográfica). Em um segundo instante deve levar em consideração aos impactos que podem ser gerados pela construção. Pode-se citar a necessidade de grandes áreas e o desmatamento das mesmas como os principais aspectos, uma vez que não se trata de um material quimicamente modificado (ARAGÃO, 2008).

2.4. Caracterização Tecnológica

Caracterização tecnológica de minérios é, segundo Reis (2005), uma fase essencial para a otimização da rota de processo, uma vez que a mesma fornece dados primordiais ao engenheiro responsável. Desses dados podem ser citadas as características mineralógicas e de textura, que permitem distinguir a relevância entre os minerais e quantificar aqueles que forem de interesse. O procedimento permite ainda um maior conhecimento da rocha, bem como suas estruturas, tamanho de partículas, propriedades físicas e químicas dos minerais. Dentre essas propriedades citam-se a massa específica, a reflexão e refração de luz, propriedades magnéticas, etc. Tais informações são relevantes para apontar deficiências no processo produtivo e assim definir uma rota ideal para o processo, a fim de que o produto atenda as demandas e necessidades do mercado.

Neumann *et al.* (2004) ainda dizem que a mineralogia e as características intrínsecas do material, o objetivo e abrangência do estudo, a execução das rotas sugeridas, o fornecimento de capital e de tempo, e a análise crítica dos resultados são variáveis que fazem com que a forma de caracterizar uma amostra de minério seja única. Existem, porém, alguns estágios dependentes entre si, que são frequentemente utilizados e permitem a descrição de uma amostra de forma geral.

De acordo com Neumann *et al.* (2004), esses estágios são: fracionamento da amostra, identificação das fases, quantificação dos minerais e verificação da liberação do mineral de interesse. Este presente trabalho não tem foco em estudos de liberação de minerais, uma vez que o referido filito não possui nenhuma particularidade mineralógica, como volume de determinado mineral-minério, a ponto de configurar potencial de concentração. A Figura 5 exemplifica um fluxograma geral das etapas comumente utilizadas para caracterizar tecnologicamente um minério.

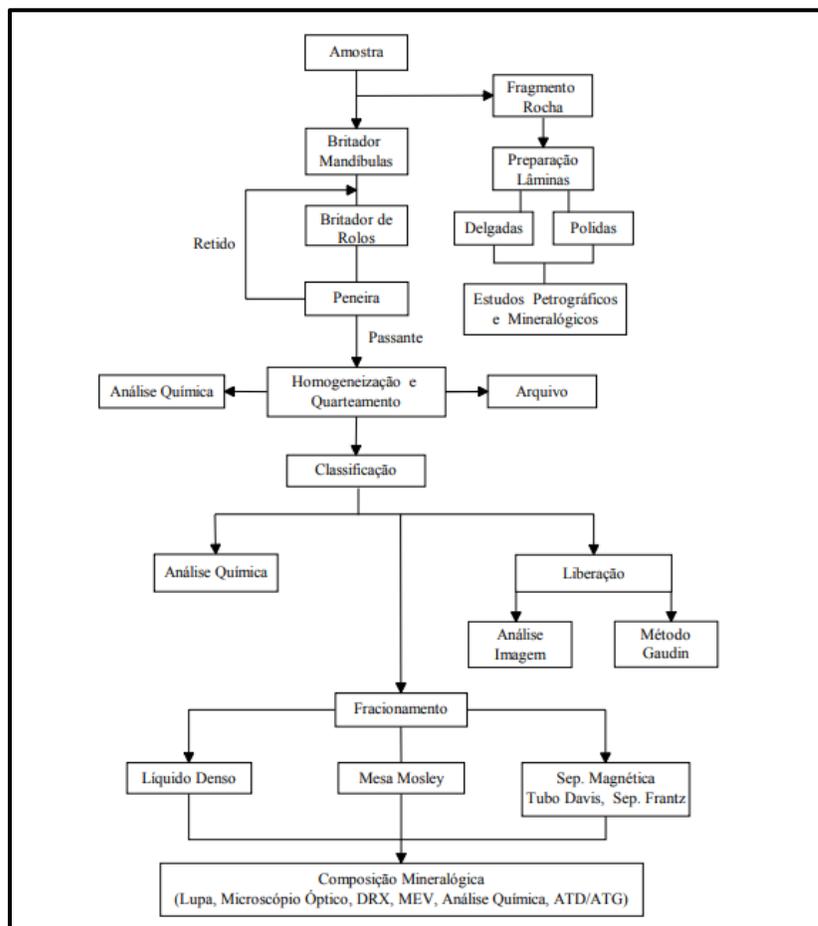


Figura 5 - Modelo de fluxograma para caracterização tecnológica de minérios, adaptado de Neumann *et al.*, 2004.

2.4.1. Fracionamento da amostra

O fracionamento da amostra é o primeiro estágio da caracterização tecnológica de minérios. O método consiste em identificar os minerais por meio de suas características singulares, otimizar a quantificação dos mesmos e determinar algumas características físicas úteis tecnologicamente. Quando feito de forma correta, essa etapa reduz os erros associados a quantificação e fornece os primeiros dados para a determinação da rota de processamento do material (SALES, 2009).

A amostra passa por uma etapa de cominuição, onde é britada e moída até atingir uma granulometria ideal que não gere uma quantidade excessiva de finos. Em seguida é homogeneizada, quarteada, a partir da qual alíquotas serão destinadas às análises. Dentre as análises, pode-se citar a análises química da amostra global e do fracionamento, identificação da assembleia mineralógica e sua quantificação, espectro de liberação por análise de imagem (quando necessária), dentre outras (NEUMANN *et al.*, 2004).

As amostras destinadas ao fracionamento são peneiradas a úmido e separadas por faixa de tamanho de acordo com a série Tyler[®]. Excluído o material classificado como fino, ou seja, passante na peneira de malha mais fina, as amostras são secadas, pesadas, fracionadas e então são determinadas as características físicas como massa específica e propriedades magnéticas. Picnometria convencional (frasco de Gay-Lussac) ou picnometria a gás e separação magnética são métodos de determinar essas características, respectivamente (NEUMANN *et al.*, 2004).

2.4.2. Identificação das fases

De acordo com Sales (2009), o estágio de identificação das fases é fundamental dentro da caracterização tecnológica e se baseia nos dados obtidos no estágio anterior. A caracterização é realizada, em geral, em escala microscópica e para isso os principais procedimentos usados nessa etapa são as microscopias ópticas, microscopia eletrônica e a difratometria de raios X. Dentre a microscopia óptica, pode-se citar trabalhos em lupa, microscópio estereoscópico, microscópio petrográfico de luz transmitida e de luz refletida.

De acordo com Barbosa *et al.* (2014)

As técnicas de caracterização combinadas com microscopia óptica são bastante usadas, pois permitem uma análise de amostras em grãos sem a necessidade de montar seções polidas ou delgadas, ao contrário da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O MEV, por ser um equipamento de alto custo e exigir um tratamento das amostras com polimentos e recobrimento com carbono grafite pode inviabilizar as análises quando não se quer uma precisão tão grande.

A difratometria de raios X, por sua vez, é um método que, segundo NEUMANN *et al.* (2004) deve ser aplicado para materiais não amorfos e se baseia na interação de ondas na frequência de raios X, entre 0,70 e 2,30 Å, com planos de repetição sistemática.

2.4.3. Quantificação dos minerais

O terceiro estágio da caracterização consiste na quantificação dos minerais que, comparado com a etapa de qualificação dos minerais, possui um grau de complexidade maior. Segundo Neumann *et al.* (2004), os métodos mais comumente aplicados são cálculos estequiométricos a partir de análise química e da composição mineralógica da amostra; método de refinamento de espectro de difração de raios X multifásico total (método de Rietveld); análises termogravimétricas e análise de imagens. Esses métodos são comumente utilizados combinados.

Para que essa etapa seja realizada, são necessários dados previamente determinados como mineralogia das amostras, além da disponibilidade de recursos analíticos. Essa etapa é mais fácil para frações mais concentradas. Uma forma de simplificar a quantificação é agrupar os minerais de acordo com as características do produto ou com a reação a um determinado processo (SALES, 2009).

2.4.4. Determinação de área superficial específica (B.E.T.)

De acordo com Bauer (2012), a área superficial é uma propriedade de sólidos que relaciona a área de superfície total com a massa ou o volume unitário do sólido. Para determinar a área superficial específica de forma simples utiliza-se o método de adsorção gasosa, que, de forma geral, consiste na identificação do volume de gás necessário para recobrir a superfície analisada (SOARES, 2007).

O B.E.T. é um método desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller em 1940, utilizado para a determinação da área superficial específica (ASE) de sólidos, utilizando técnicas de adsorção de um gás inerte, geralmente o nitrogênio. O modelo fornece o volume de gás necessário para ser formada uma camada de gás adsorvido ao redor da amostra e em seus poros abertos. A partir desse dado é calculada a área superficial específica à massa (LEOFANTI *et al.*, 1998).

A propriedade ASE se relaciona diretamente com a quantidade de água necessária para compor argamassas e, conseqüentemente, na quantidade de cimento para manter o fator

água/cimento preestabelecido. Além disso, relaciona-se com a coesão da argamassa, uma vez que a mesma resulta da aglutinação e união dos constituintes pelo material mais fino, ou seja, de maior área superficial específica (BOMBLED, 1967 *apud* RAGO e CINCOTTO, 1999).

2.5. Cimento Portland

A ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland define cimento Portland como sendo um material de granulometria fina, cujas principais propriedades são a aglomeração e a capacidade de endurecer ao reagir com água. Uma vez endurecido, o cimento Portland adquire elevada resistência, se tornando assim um material essencial para a construção civil.

É constituído, de uma forma geral, por argila ou xisto, fontes de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), e cal (CaO). Tais compostos representam cerca de 95% a 96% da massa do cimento. Os outros 4% a 5% podem ser a magnésia (MgO), anidrito sulfúrico (SO_3) ou impurezas como o óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) e óxido de titânio (TiO_2) (BAUER, 2012). A variação na sua composição química dá ao material características físicas e químicas específicas.

Segundo Patton (1978), a composição ideal da massa crua de cimento Portland seria de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 - Composição ideal do cimento Portland

Elemento	%
SiO₂	15,5
Al₂O₃	2,5
Fe₂O₃	2,0
CaO	42,0
MgO	2,5
CO₂	35,5
TOTAL	100

Através da calcinação do clínquer e adições, obtêm-se o cimento Portland. Define-se clínquer como sendo o produto da calcinação a 1450°C da mistura das matérias-primas constituintes do cimento Portland nas proporções esperadas como mostrado na Tabela 5. Tais insumos são previamente pulverizados e homogeneizados. A fim de modificar algumas propriedades e/ou adaptar o cimento a condições específicas, incorpora-se ao material cru adições. As adições mais empregadas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (PATTON, 1978).

A NBR 16697 (ABNT, 2018) reconhece no mercado dez tipos de cimento Portland, que variam de acordo com a presença ou não de adições e de propriedades especiais, mostrados na Tabela 6, que visam uma melhor adequação ao mercado. Além disso, também são classificados de acordo com os valores mínimos de resistência à compressão após 28 dias de cura em classe de resistência (25, 32 ou 40), conforme estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2019). A norma também delimita os requisitos químicos, físicos e mecânicos, de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 6 - Tipos de cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	
	Com adição	CP I-S	
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E	
	Com material carbonático	CP II-F	25, 32 ou 40
	Com material pozolânico	CP II-Z	
Cimento Portland de alto-forno		CP III	
Cimento Portland pozolânico		CP IV	
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40
	Não estrutural	CPB	-

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 7 - Requisitos químicos

Determinações químicas	Limites (% da massa)									
	CP I	CP I-S	CP II-E	CP II-F	CP II-Z	CP III	CP IV	CP V	CPB Estrutural	CPB Não estrutural
Resíduo insolúvel	≤ 5,0	≤ 3,5	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 18,5	≤ 5,0	-	≤ 3,5	≤ 3,5	≤ 7,0
Perda ao fogo	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 8,5	≤ 12,5	≤ 8,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 12,0	≤ 27,0
MgO	≤ 6,5	-	-	-	-	-	-	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 10,0
SO ₃	≤ 4,5									

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 8 - Requisitos físicos e mecânicos

Sigla	Classe	Finura Resíduo na peneira 75 µm (%)	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão			
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP I	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CP I-S								
CP II-E								
CP II-F	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CP II-Z								
CP II-Z								
CP III	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CP IV								
CP IV								
CP V	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CP V								
CP V								
CP V	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CP V								
CP V								
CP V	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0
CP V								
CP V								
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-
CPB Estrutural	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CPB Estrutural								
CPB Estrutural								
CPB Estrutural	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CPB Estrutural								
CPB Estrutural								
CPB Estrutural	40	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPB Estrutural								
CPB Estrutural								
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018)

2.6. Agregado miúdo

A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) define agregado miúdo como o material cuja granulometria está compreendida na faixa entre 4,75mm e 150µm. Em relação a composição dos grãos minerais, devem ser duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam alterar características do cimento, tais como hidratação, endurecimento, proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade e o aspecto visual externo do concreto.

A areia pode ter diversas origens, sendo elas de rio, de cava, de britagem, de escória e de praias e dunas. Pode ser caracterizada por sua granulometria em fina (de 0,05 mm a 0,3 mm), média (de 0,3 mm a 1,20 mm) ou grossa (de 1,2 mm a 4,8 mm), ou ainda pela sua dosagem, onde porções de areia de diferentes faixas granulométricas são misturadas e seu peso específico determinado (BAUER, 2012).

Dentre as aplicações do material na construção civil destaca-se no preparo de argamassas, em concreto betuminoso, em concreto de cimento, em pavimentos rodoviários e na construção de filtros (BAUER, 2012).

2.7. Cal

Rochas calcárias submetidas ao processo de calcinação são comumente denominadas cal. Esse material é largamente utilizado na indústria de construção civil como material aglomerante. Além de rochas calcárias, a cal pode ser originada de depósitos de resíduos de esqueletos animais (BAUER, 2012).

No processo de calcinação, realizado a uma temperatura média de 900°C, o carbonato de cálcio (CaCO_3) é decomposto em cal virgem, óxido de cálcio (CaO), e dióxido de carbono (CO_2). O óxido de cálcio não possui propriedades aglomerantes e por isso é necessário que o mesmo passe por uma etapa de hidratação, originando-se o hidróxido de cálcio [Ca(OH)_2]. Quando a etapa de hidratação é realizada em fábricas, denomina-se o produto como cal

hidratada. Tal etapa é extremamente exotérmica, podendo liberar até 400°C (HAGEMANN, 2011).

Segundo Bauer (2012) a substituição de cal virgem pela cal hidratada apresenta algumas vantagens tais como uma maior facilidade de transporte, armazenamento e manuseio, uma vez que o material já se encontra pronto para ser utilizado. Este fato oferece ao produto uma maior segurança, principalmente quanto a queimaduras, uma vez que não são executadas as operações de extinção e envelhecimento. Em contrapartida, seu rendimento em volume é menor, bem como a capacidade de sustentação de areia, por apresentar menor coesão.

De acordo com Carasek (2007), a aplicação da cal em argamassas traz diversas vantagens. Além de ser um material aglomerante, a cal apresenta propriedades plastificantes e de retenção de água e com isso preenchem melhor e de forma mais fácil a superfície do substrato, aumentando a aderência da massa e reduzindo a quantidade de vazios e de fissuras geradas. Tais características são fundamentais para argamassas de revestimento.

Conforme Stachera Jr (2007), para a produção de 1kg de cal são liberados 0,785kg de CO₂. Tal gás é tido, juntamente com o vapor d'água, o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), como um dos principais causadores do efeito estufa. Esse fenômeno, apesar de ser considerado um fenômeno natural, vem se intensificando nas últimas décadas devido aos eventos científicos proporcionados pelo homem, que resultam em uma maior liberação desses gases na atmosfera, que se concentram na baixa atmosfera e conseqüentemente retém a radiação infravermelho causando o fenômeno denominado aquecimento global (MENDONÇA, 2007).

2.8. Argamassa

Petrucci (1975) define argamassa como sendo uma mistura composta por um material ativo denominado pasta e um material inerte. A pasta nada mais é que a combinação de um material aglomerante e água, enquanto o material inerte é representado pelos agregados miúdos. A fim de alterar e proporcionar propriedades específicas à argamassa são adicionados produtos especiais, tais como adições, minerais ou não (ex: escória e pozolana) e aditivos.

As principais características das argamassas são endurecimento e aderência, portanto tal material é amplamente utilizado na construção civil nas etapas de assentamento de alvenarias, pedras e tijolos, revestimento como emboço e reboco, em acabamentos de tetos e paredes, como reparo em obras de concretos etc. (CARASEK, 2007).

As formas de classificar as argamassas são diversas. Os principais critérios estão representados na Figura 6.

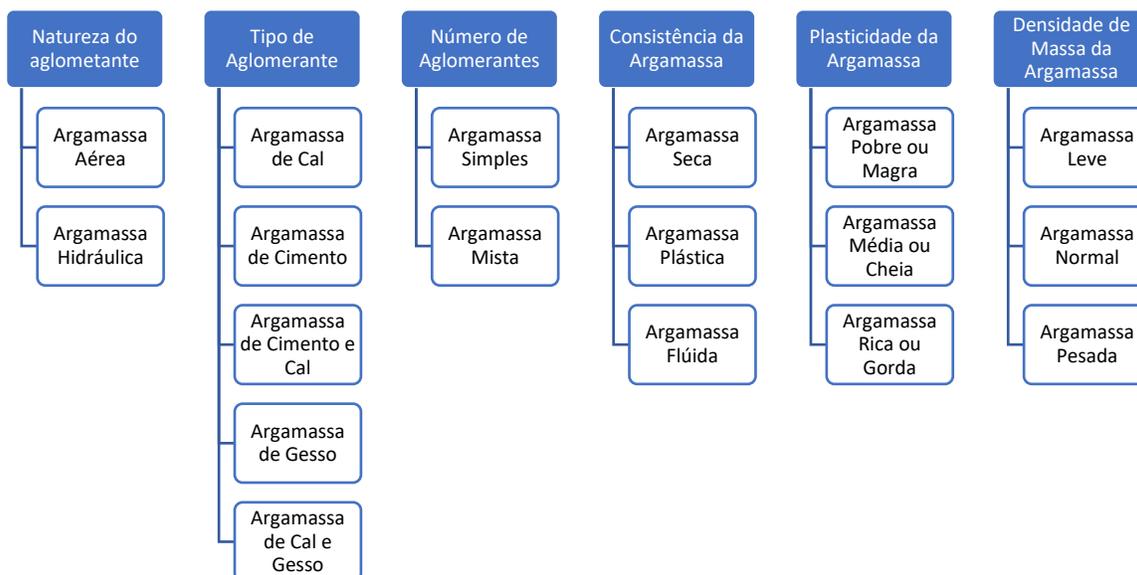


Figura 6 - Classificação da argamassa, adaptado de Carasek, 2007.

Além dessas classificações, pode-se categorizar a argamassa de acordo com sua aplicação na construção. Para cada aplicação estão associadas propriedades intrínsecas que devem ser levadas em consideração para obter uma massa de boa qualidade (CARASEK, 2007). Em virtude do objetivo do trabalho, serão descritas apenas as características da argamassa de revestimento.

Maciel *et al.* (1998) definem as principais atuações da argamassa de revestimento. São elas na proteção de elementos de vedação em edifícios, no auxílio no cumprimento das funções de vedação, na regularização de superfícies dos elementos de vedação, a fim de receber outros revestimentos ou constituir o acabamento final, e na contribuição da estética de

faixadas. Para que a argamassa possa desempenhar sua função de forma correta, deve-se atentar a algumas propriedades principais. São elas: trabalhabilidade, retração, aderência, permeabilidade à água, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações (CARASEK, 2007).

Uma das principais propriedades da argamassa é a trabalhabilidade. Tal característica é determinada de forma qualitativa e influencia diretamente na qualidade da argamassa e nas outras propriedades (RAGO e CINCOTTO, 1999). De acordo com Maciel *et al.* (1998), considera-se trabalhável, uma argamassa em que penetra facilmente a colher de pedreiro, mas que ao mesmo tempo não é tão fluida; ao ser transportada conserva-se coesa, mas sem aderir à colher ao ser lançada; apresenta fácil distribuição e bom preenchimento das reentrâncias da base; ao ser aplicada, não enrijece rapidamente.

Petrucci (1975) define retração como a diminuição de volume da argamassa ao secar e endurecer. Essa propriedade está diretamente relacionada com a quantidade de água e cal utilizadas na mistura. Além disso, deve-se atentar ao processo de secagem a fim de evitar o aparecimento de fissuras. Argamassas no estado plástico, secas pela ação do sol e vento ou se o processo de retração da argamassa endurecida for impedido, favorece o aparecimento de fissuras.

Com o avanço tecnológico de materiais e o desenvolvimento do cimento Portland, a argamassa produzida com esse material passou a apresentar maiores resistências e melhores aderências (CEOTTO *et al.*, 2005). Segundo Maciel *et al.* (1998), aderência consiste na fixação da argamassa no substrato através da absorção da argamassa pelos poros, reentrâncias e saliências da base e da capacidade de se manter fixa à base. A propriedade se relaciona diretamente com a trabalhabilidade e retenção de água e com o aspecto da base. Esta deve estar limpa, sem oleosidade e com rugosidade adequada. Além disso, deve-se atentar a superfície de contato efetivo entre a base e a argamassa. É recomendado comprimir a argamassa após ser aplicada para assim aumentar o contato base-massa.

Já a resistência mecânica é a capacidade da argamassa de suportar ações mecânicas, tais como abrasão superficial, impacto e contração termo-higroscópica. A propriedade depende da quantidade e natureza dos aglomerantes e agregados constituintes da massa, bem como a técnicas de aplicação e acabamento (MACIEL *et al.*, 1998). De acordo com Petrucci (1975),

os valores obtidos para os testes de resistência mecânica para argamassas de cal variam entre 5 e 15 kgf/cm², equivalente a 0,49 a 1,47 MPa, após 28 dias de cura. Esses valores independem do traço e, segundo a norma NBR 13279 (ABNT, 2005), o teste de resistência à compressão axial só é pertinente se for realizado uma média de no mínimo quatro corpos de prova com um desvio padrão máximo de 0,5MPa.

Permeabilidade à água está relacionada com a capacidade de transmitir fluidos e proteger fachadas, principalmente, da infiltração de água, evitando assim problemas que comprometem a saúde, higiene dos moradores, bem como a estética do edifício. Locais de elevado índice de precipitação pluviométrica e em casos onde o revestimento de argamassa não recebe nenhum tipo de acabamento final como, por exemplo, pintura, deve-se atentar quanto a essa propriedade (CARASEK, 2007).

A capacidade de absorver deformações está relacionada de forma inversa ao módulo de elasticidade da argamassa (SILVA, 2006). O comportamento elástico da argamassa nada mais é que a propensão a deformação sem que haja ruptura e a capacidade de retornar as dimensões iniciais ao fim da aplicação de tensões, por isso está relacionado com a formação de fissuras, uma vez que fornece características como deformabilidade e rigidez do revestimento de argamassa (SILVA e CAMPITELI, 2006).

Bauer (2012) estabelece uma relação inversa entre a distribuição granulométrica do agregado e o fator água/cimento, ou seja, quanto menor a granulometria do material, maior o fator água/cimento. Como consequência, a resistência e a trabalhabilidade serão aumentados, até um valor crítico, onde a argamassa passa a não ser trabalhável, uma vez que a coesão aumenta com o aumento de materiais finos. Vale ressaltar que a coesão resulta da aglutinação e união dos constituintes pelo material mais fino, ou seja, de maior área superficial específica (BOMBLED, 1967 *apud* RAGO e CINCOTTO). Em contrapartida, a permeabilidade apresenta reação contrária, ou seja, com o aumento da quantidade de finos, menor a permeabilidade da argamassa (BAUER, 2012).

Em relação a capacidade de retenção de água, Carneiro (1993) define uma proporcionalidade entre a quantidade de finos na argamassa e a capacidade de reter água. Como consequência, a retração é afetada, principalmente nas primeiras 24 horas. Em contra partida, ao avançar os

dias de cura, a presença de finos acaba se tornando favorável à retração, onde se observa um aumento da mesma.

2.9. Materiais Pozolânicos

Pozolana é definido como um material inorgânico, natural ou artificial, que possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, composto basicamente por sílica e/ou alumínio. Ao entrar em contato com hidróxido de cálcio, em condições específicas de umidade, granulometria e temperatura, reage quimicamente, originando um composto com propriedades cimentantes (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

A norma NBR 12653 (ABNT, 2012) classifica a pozolana em três classes, “N”, “C” e “E”. A primeira, classe “N”, refere-se a materiais naturais e artificiais, cujos requisitos químicos e físicos para materiais pozolânicos estão especificados na Tabela 9 e Tabela 10. Podem-se citar argilas calcinadas, materiais vulcânicos e cherts silicosos como constituintes desta classe.

Na classe “C” estão os materiais originados da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, denominados de cinza volante. Tal material deve obedecer às especificações na Tabela 9 e Tabela 10. Já na classe “E” são enquadrados os materiais que possuem as características físicas e químicas especificadas, porém não se encaixam nas outras classes.

Tabela 9 - Requisitos químicos

Propriedades	Classe de materiais pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$

Tabela 10 - Requisitos físicos

Propriedades	Classe de materiais pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μm	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$
Índice de atividade pozolânica:			
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$
-com a cal aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$
-água requerida	$\leq 115\%$	$\leq 110\%$	$\leq 110\%$

3. METODOLOGIA

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos experimentais realizados, foram divididos em duas etapas: de caracterização tecnológica do material e de aproveitamento de estéril para produção de argamassa.

3.1. Caracterização Tecnológica

Neste tópico são abordados os procedimentos de amostragem e caracterização química, mineralógica, bem como testes de umidade, massa específica, análises térmicas e área superficial específica. A Figura 7 sintetiza as etapas de caracterização realizadas.

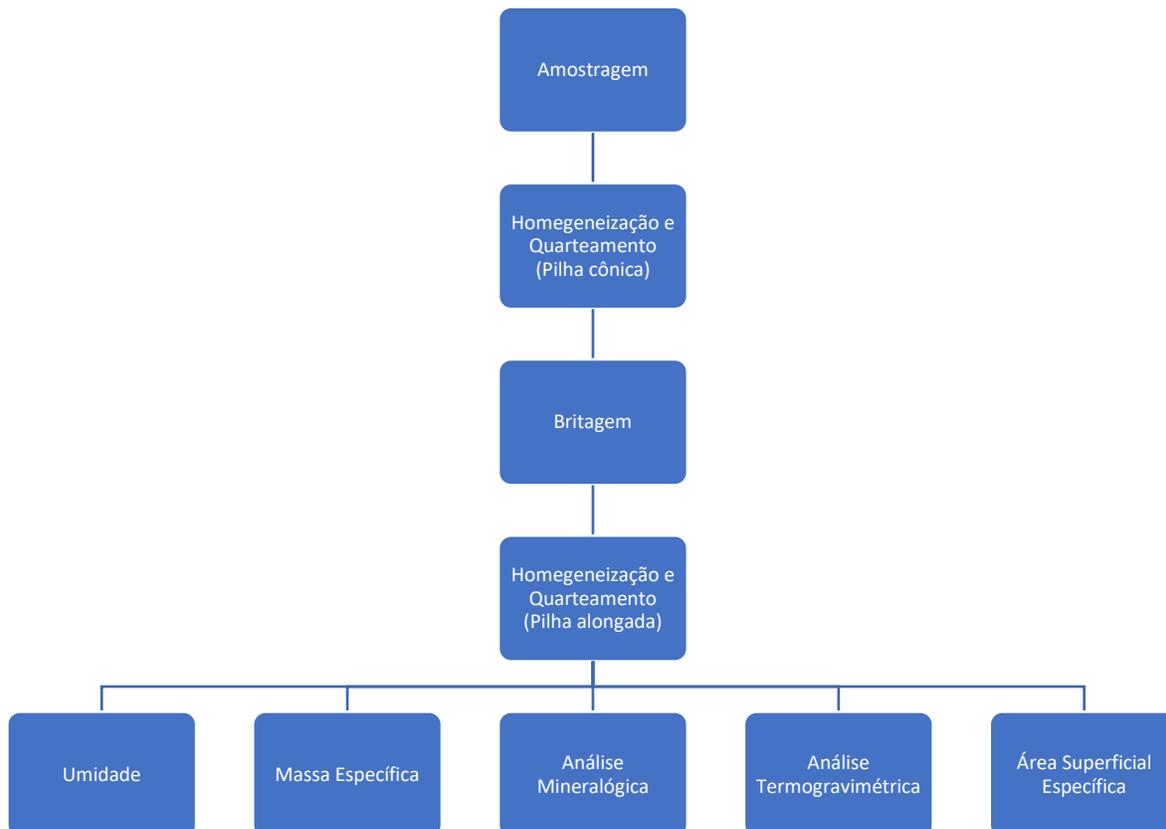


Figura 7 - Fluxograma da etapa de caracterização

3.1.1. Amostragem

O minério estava disposto na mina de calcário em uma pilha longitudinal, funcionando como uma leira, ou seja, estrutura de proteção para conter a água da chuva que escoava do talude. Foi feita uma amostragem manual, probabilística e aleatória, colhendo-se, com ajuda de uma pá, alíquotas de minério na base, no meio e no topo da pilha, de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004). A distância de coleta entre os baldes foram de 20 passos, sendo cada passo aproximadamente 0,60m.

Em seguida, o material coletado foi direcionado ao Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG campus Araxá. Uma amostra do material (Figura 8) apresentava umidade maior que as demais, por isso foi submetida a secagem na estufa durante 24 horas a 100°C.



Figura 8 - Material úmido

Por apresentar uma granulometria heterogênea, o material foi previamente classificado por uma peneira de 2" (50mm) de abertura, e, com a ajuda de um martelo de geólogo, o material retido foi fragmentado, como mostrado na Figura 9.



Figura 9 - Pré-classificação do material

Na sequência o material foi pesado e disposto em uma pilha cônica sobre uma lona no chão do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, como representado na Figura 10, homogeneizado com a ajuda de uma enxada, devido ao grande volume de amostra, e quarteado, como mostrado na Figura 11.



Figura 10 - Pilha cônica



Figura 11 – Sequência de quartejamento

Em seguida, uma amostra do material foi cominuído em britador de mandíbula de 1 eixo com abertura (set) ajustado na posição 1/2, homogeneizada, disposta em pilha alongada, representado na Figura 12, e quarteeda para ser destinada aos testes de picnometria a gás, difratometria de raio X (DRX), determinação umidade por diferença de pesos e testes de área superficial específica (via B.E.T.) e análises termogravimétricas (TG).



Figura 12 - Pilha alongada

3.1.2. Umidade

Para a determinação da umidade do material, a alíquota 1 foi pesada antes da secagem e em seguida levada à estufa, onde foi mantida por 24 horas a uma temperatura de 100°C. Ao final, o material foi novamente pesado e, a partir da Equação 1, de acordo com a NBR 9939 (ABNT,1987), foi determinada a umidade do filito.

$$U = \frac{M_t - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U: teor de umidade total, em %.

Ms: massa final da amostra seca, em g.

Mt: massa inicial da amostra, em g.

3.1.3. Massa Específica

Para determinação da massa específica, foi realizado o teste de picnometria a gás utilizando o equipamento Quantachrome, modelo Ultrapyc 1200e, pertencente ao Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP. A amostra analisada foi de filito pulverizado (< 200#, ou seja, 0,075 µm) e teve os seguintes parâmetros:

- (i) Preenchimento do porta amostra médio (58,60 cm³);
- (ii) Temperatura ambiente (23,9 °C);
- (iii) Pressão alvo igual a 17 psi;
- (iv) Gás hélio utilizado;
- (v) Tempo de equilíbrio automático;
- (vi) Tempo de purga igual a 4 minutos.

O resultado final é o valor médio de 3 medições, com desvio padrão de 0,0050%.

3.1.4. Análise Química

As análises químicas foram fornecidas pela empresa Mineração Dornas e realizadas no laboratório SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. Foram analisadas duas amostras do filito, oriundas de uma amostragem realizada anteriormente, denominadas AMOSTRA 1 e AMOSTRA 2. Os óxidos foram caracterizados pelo método Fusão com Tetraboro de Lítio e Quantificação por fluorescência de raios X (FRX). Foi realizada também a perda ao fogo por calcinação (PPC) da amostra a 405°C e/ou 1000°C.

3.1.5. Análise Mineralógica

A composição mineralógica qualitativa da amostra de filito foi feita por difratometria de raios X (DRX), pelo método do pó total. O equipamento utilizado foi o difratômetro de marca PANalytical que possui tubo de cobre (com comprimento de onda igual a 1,54056 Å) e pertence ao Laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

3.1.6. Análises termogravimétricas (TG)

O ensaio de termogravimetria (TG/DTA) foi realizado no Laboratório de Análises Térmicas/CEFET-MG no analisador térmico da marca SHIMADZU DTG – 60H. Os parâmetros de ensaio foram: taxa de aquecimento 10°C/min, temperatura máxima 900°C, atmosfera utilizada de ar artificial, fluxo de gás 50ml/min. A massa utilizada variou de 7,3611 a 7,1141 mg.

3.1.7. Área superficial específica (B.E.T.)

A determinação da área superficial específica do minério estudado foi obtida pela técnica B.E.T. de adsorção de nitrogênio, em duplicata, utilizando um analisador de área superficial, equipamento BET NOVA 1200e (aquisição de dados pelo software NovaWin2) da Quantachrome, pertencente ao Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP. A amostra analisada foi de filito pulverizada (< 200#) e o ensaio apresentou as seguintes condições: (i) amostra preparada a uma temperatura de 195 °C e desgaseificada por 4 horas; (ii) o equilíbrio se deu na faixa entre 60s e 120s, obtendo o mínimo e máximo, respectivamente, de flutuação da pressão relativa antes de sua tomada como ponto da isoterma de adsorção-dessorção.

3.2. Aproveitamento de estéril para produção de argamassa

Para moldar os corpos de prova foram separados 3,5kg do filito, fragmentado em britador de mandíbula tipo Dodge, conforme mostrado na Figura 13 com o set (abertura) ajustado na posição 3/4, moídos em moinho de jarro de cerâmica, de acordo com a Figura 14 e classificados de forma manual em peneira de 200#, conforme mostrado na Figura 15.



Figura 13 - Sequência da britagem



Figura 14 - Sequência de moagem



Figura 15 - Classificação em peneira de 200#

Para definir as proporções do traço utilizado, foram definidas as densidades aparentes dos componentes da argamassa. Para isso, a cal, filito e cimento CP II-F32 foram transferidos para uma proveta até que atingisse a marca de 250 ml e pesados, de acordo com a Figura 16.



Figura 16 - Procedimento para cálculo da densidade aparente

O teste foi realizado em duplicata para todos os materiais. Com o volume e massa conhecidos, foi calculada a densidade aparente através da Equação 2.

$$d = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Onde:

d: densidade;

m: massa;

v: volume.

Para a determinação da massa unitária da areia, o material foi transferido para uma caixa metálica de dimensões 31,3 x 31,5 x 15 cm, com auxílio de uma pá.

Após a caixa ser preenchida, o excesso do material foi retirado com a ajuda de uma chapa metálica e pesado, conforme mostra a Figura 17. O teste foi feito em duplicata e a massa unitária definida pela Equação 2.



Figura 17 - Sequência de determinação da massa unitária da areia

A fim de aproximar o teste da realidade das obras foi utilizado o traço, ou seja, as proporções dos materiais constituintes da argamassa comumente empregado na confecção de argamassas, utilizando um recipiente de 200ml para compor a mistura. A quantidade de cal foi alterada e a relação água/cimento foi mantida constante.

3.2.1. Corpos de prova

Com o traço em volume definido, moldaram-se no total 18 corpos de prova em molde cilíndrico de dimensões 5x10 cm, seguindo o procedimento descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram realizadas duas substituições da cal e, portanto, três composições, sendo elas 100% cal (F0), 50% cal (F50) e 25% cal (F75).

Para a definição do volume de água utilizado na mistura foi realizado um teste manual e qualitativo. Pesou-se 500g da mistura com 100% de cal, que contém areia, cimento e cal na sua composição, e adicionou água até atingir uma relação água/cimento trabalhável. Esse valor é determinado pela percepção do trabalhador.

As misturas e a água foram pesadas e adicionadas a um misturador (Figura 18) por 30 segundos. Após esse tempo, o equipamento foi desligado, a pá de mistura retirada e a superfície interna do recipiente e a pá foram raspadas. Essa etapa foi realizada em, no máximo, 60 segundos. Em seguida o misturador foi novamente ligado por mais 30 segundos. Com as misturas prontas foram moldados os corpos de prova. Cada molde foi preenchido com quatro camadas de material e moldados com 30 golpes cada por um mesmo operador. Os corpos foram devidamente identificados, desenformados após 24 horas e passaram pelo período de cura, ao ar, de 28 dias.



Figura 18 – Misturador

3.2.2. Ensaio de compressão

Após o período de 28 dias de cura, as resistências dos corpos de prova foram testadas através do ensaio de compressão uniaxial. O teste foi realizado no Laboratório de Edificações do CEFET-MG campus Araxá e foi utilizada uma prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca Emic, conforme a Figura 19. Os corpos de prova foram capeados com Neoprene.



Figura 19 - Prensa hidráulica de acionamento elétrico

Ao acionar o equipamento, o mesmo comprime o corpo de prova até que o mesmo se rompa, fornecendo assim o valor a força máxima suportada. A partir da Equação 3 obtêm-se a tensão de compressão suportada.

$$\sigma = \frac{F_c}{A} \quad (3)$$

Onde:

σ = Resistência a compressão (kPa)

F_c = Força aplicada (kN)

A = área (m²)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos dos testes de caracterização tecnológica e de aproveitamento de estéril para produção de argamassa.

4.1. Caracterização Tecnológica

Os resultados obtidos neste tópico foram segmentados em amostragem, umidade, massa específica, análise química, análise mineralógica, análise termogravimétricas e área superficial específica.

4.1.1. Amostragem

O material amostrado foi pesado, resultando em uma massa total de 188,611 kg. Após ser homogeneizado e quarteado, resultou em alíquotas de 11,100 kg, como mostrado na Figura 20.



Figura 20 - Amostra final

A amostra de 11,1 kg passou por uma segunda homogeneização e quarteamento, resultando em alíquotas de 5,524 kg. Uma alíquota foi escolhida aleatoriamente, britada, homogeneizada, disposta em pilha alongada e dela quarteadas sete alíquotas, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 - Peso das alíquotas

Alíquota	Peso (g)	σ
1	215,99	15,99
2	117,35	16,37
3	134,42	16,37
4	94,45	16,37
5	87,52	16,37
6	95,61	16,37
7	95,59	16,37

4.1.2. Umidade

A alíquota 1 foi destinado ao teste de umidade. Após a secagem, apresentou uma massa seca de 207,23 g. Utilizando a Equação 1, obteve-se um valor 4,23% de umidade final.

4.1.3. Massa Específica

O teste de pycnometria a gás apontou uma massa específica de 2,86 g/cm³. Souza *et al.* (2009) analisou três cales produzidos a partir de calcário calcítico e dolomítico e obteve valores de massa específica da cal iguais a 2,45 g/cm³, 2,60 g/cm³ e 2,62 g/cm³. A massa específica do filito representa um aumento entre 16,73% a 9,16% encontrado para os cales. Tais valores de massa específica se mostraram não muito distantes ao encontrado para o filito, justificando assim sua substituição na argamassa, mas atentando para alguma interferência negativa nas propriedades da mesma.

4.1.4. Análise Química

Foram determinados os teores dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O_3 e TiO_2 , além da perda ao fogo. Esses valores estão representados na Tabela 12. Vale ressaltar que o material provém de uma amostragem realizada anteriormente.

Tabela 12 - Análises químicas (%)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O_3	TiO_2	Perda ao Fogo
Amostra 01	65,100	15,900	6,510	0,520	1,320	3,530	<0,100	0,930	5,150
Amostra 02	66,400	15,500	6,280	0,040	1,500	3,570	<0,100	0,910	4,670
\bar{x}	65,750	15,700	6,390	0,280	1,410	3,550	<0,100	0,920	4,910
σ	0,650	0,200	0,115	0,240	0,090	0,020	0,000	0,010	0,240

Os resultados obtidos pela análise química apontam uma elevada concentração de óxido de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), podendo assim classificar o filito como alumino silicato de ferro.

4.1.5. Análise Mineralógica

A análise do difratograma apontou quartzo, mica (fengita) e caulinita como os principais constituintes do filito. Esses minerais são esperados, uma vez que são os principais formadores dos filitos. A Figura 21 representa graficamente o resultado obtido. Minerais em proporção inferior ao limite de detecção da difratometria de raios X (0,1% p/p) podem não terem sido identificados.

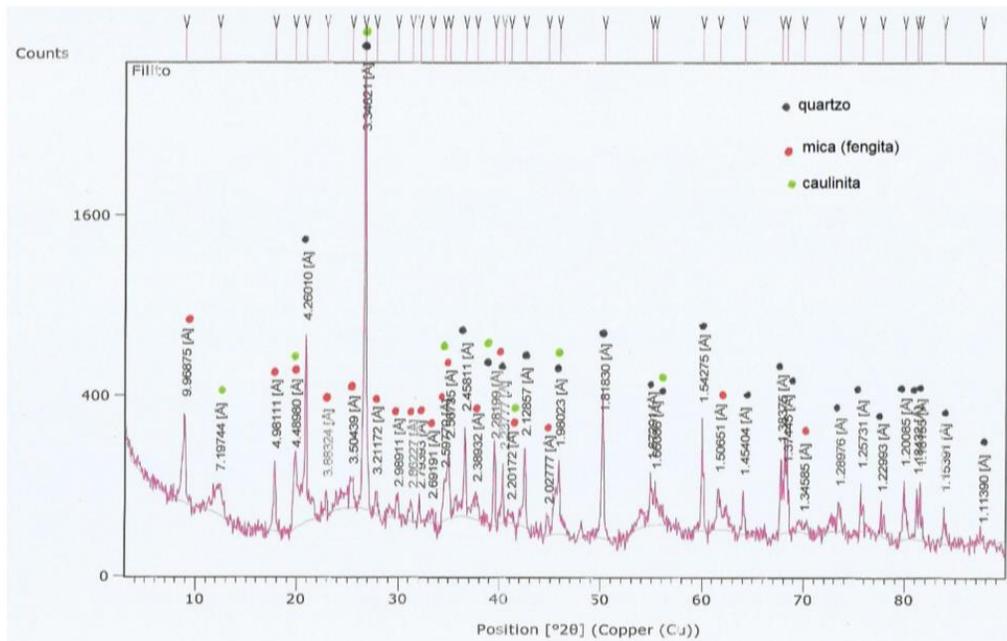


Figura 21 - Difratoograma de raios X da amostra filito.

De forma contraditória à análise química, a hematita não foi apontada como um dos minerais constituintes da amostra. Tal diferença se deve pela diferença de amostragem, presença de um veio de hematita ou contaminação da amostra.

4.1.6. Análises termogravimétricas (TG)

A partir dos dados obtidos, foi possível plotar os gráficos da análise termogravimétrica (TGA) em vermelho e análise térmica diferencial (DTA) em preto, segundo a Figura 22. **Error! Reference source not found..**

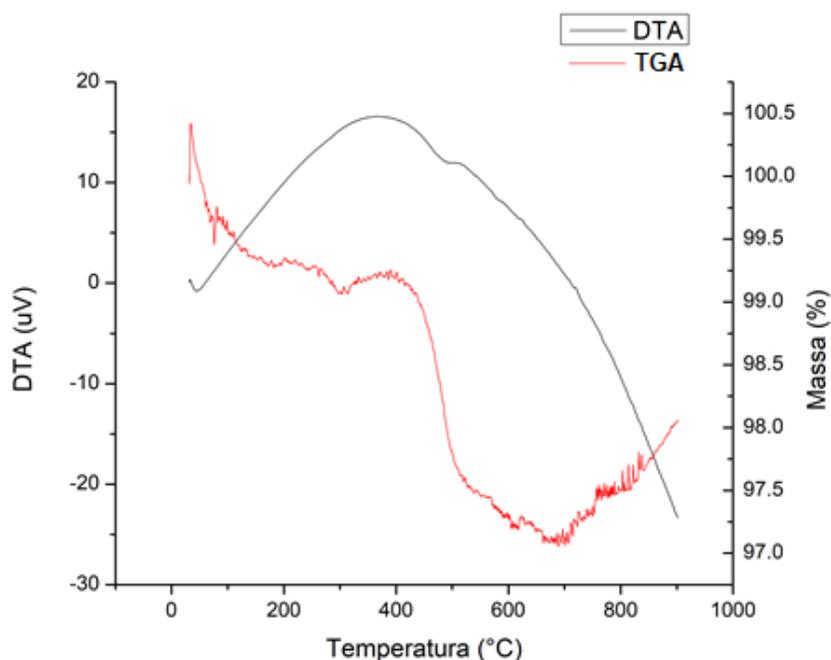


Figura 22 – Curvas análises térmicas TGA e DTA

De forma semelhante Morais *et al.* (2018) fizeram análise térmica de filito sericítico. As curvas obtidas para análise do TGA e DTA estão representadas na Figura 23. Em ambos casos as curvas de TGA mostram uma perda de massa sofrida pelas mostras. A variação de massa nas temperaturas entre 50 e 200°C estão associadas a dessorção de água da superfície das partículas. Morais *et al.* (2018) aponta como causa da perda de massa nas temperaturas entre 200 e 300°C o processo de desidroxilação da goethita, formando hematita. Tal resultado não pode ser observado no trabalho, uma vez que as análises mineralógicas não apontam a goethita como um mineral formador da amostra e as análises químicas apontam a presença de hematita na composição do filito. No intervalo entre 400 e 600°C semelhante ao que foi observado por Morais *et al.* (2018), a perda de massa está associada a desidroxilação da caulinita, se transformando em metacaulinita.

É possível analisar também que, na faixa de temperatura compreendida entre 0 e 50°C houve um ganho de massa. Tal evento não foi observado por Morais *et al.* (2018). Além disso, pela falta de picos na curva de DTA, Morais *et al.* (2018) conclui que a análise térmica diferencial

não apresentou eventos endotérmicos ou exotérmicos. De forma análoga, foi possível perceber um evento exotérmico na amostra de filito.

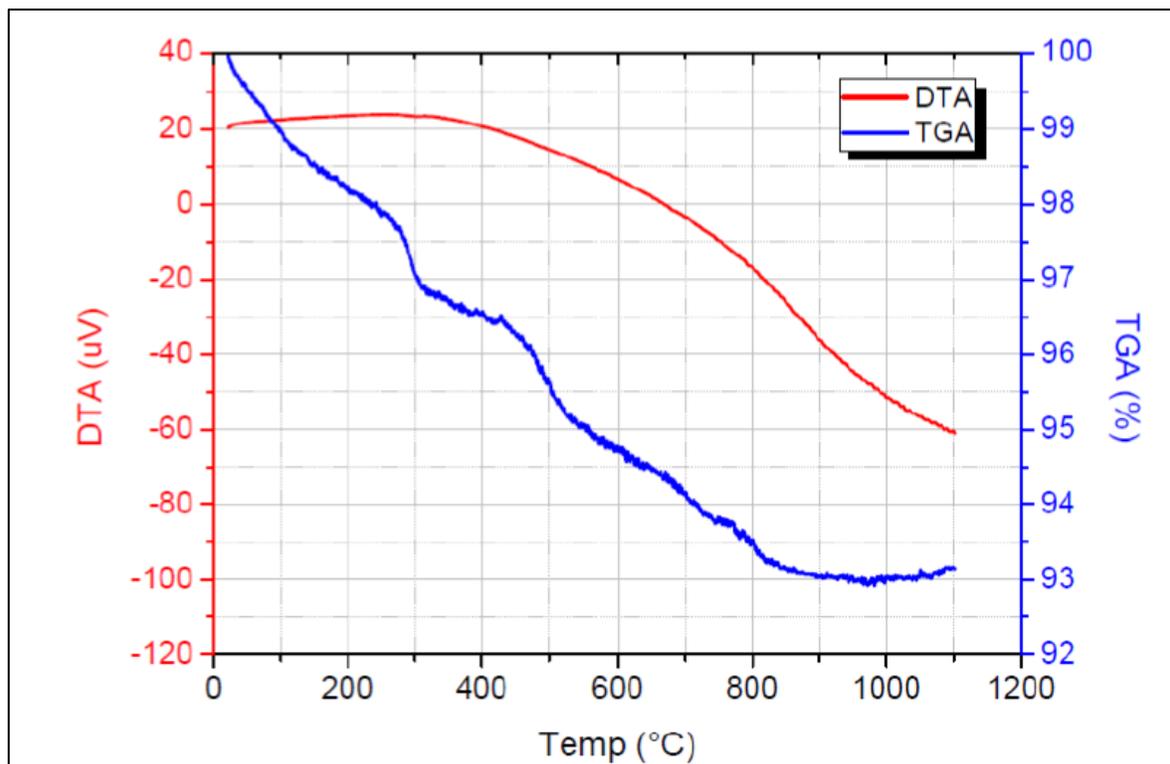


Figura 23 - Análises térmicas, adaptado de Moraes *et al.* (2018)

4.1.7. Área superficial específica (B.E.T.)

A análise de área superficial concluiu em um valor de 17,7 m²/g. O gráfico obtido pode ser encontrado em Anexo B. Souza *et al.* (2009) analisaram três cales produzidos a partir de calcário calcítico e dolomítico e obteve valores de área superficial específica iguais a 15,9 m²/g, 14,4 m²/g e 10,6 m²/g. O valor obtido para o filito mostra-se superior ao encontrado para os cales.

4.2. Aproveitamento de estéril para produção de argamassa

Os testes de densidade aparente resultaram nos valores representados na Tabela 13, onde V é o volume da proveta, M₁ e M₂ são as massas do material pesadas em duplicata e D é a densidade aparente.

Tabela 13 - Resultados Densidades Aparentes

	V (ml)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	D (g/cm ³)
Filito	250	154,97	154,59	0,61912
Cal	250	142,35	141,16	0,56702
Cimento	250	244,81	244,47	0,97856
Areia	250	23,10	22,78	1,4753

Os traços utilizados foram 1:2:8 para a composição F0, ou seja, uma proporção de cimento, para duas de cal, para oito de areia, 1:1:1:8 para a F50, ou seja, uma proporção em volume de cimento, para uma de cal, para uma de filito, para oito de areia, e 1:0,5:1,5:8 para a F75, ou seja, uma proporção em volume de cimento, para meia de cal, para duas e meia de filito, para oito de areia. Em todas as situações foram separados 2,5 kg da mistura para compor a argamassa e o teor de água foi mantido constante em 20% de água.

4.2.1. Corpos de prova

A fim de analisar a interferência do filito, foi calculada a densidade aparente para cada substituição. Os valores obtidos estão representados na Tabela 14. A partir dos resultados, observa-se um aumento da densidade da mistura com o aumento da proporção de filito.

Tabela 14 - Resultados Densidades Aparentes Misturas

	V (ml)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	D (g/cm ³)
F0	250	345,57	353,62	1,3984
F50	250	362,09	368,45	1,4611
F75	250	369,58	369,15	1,4775

Os corpos de prova moldados são mostrados na Figura 24, onde na parte superior estão representados os corpos após um dia de cura, e na parte inferior os corpos após 28 dias de cura.

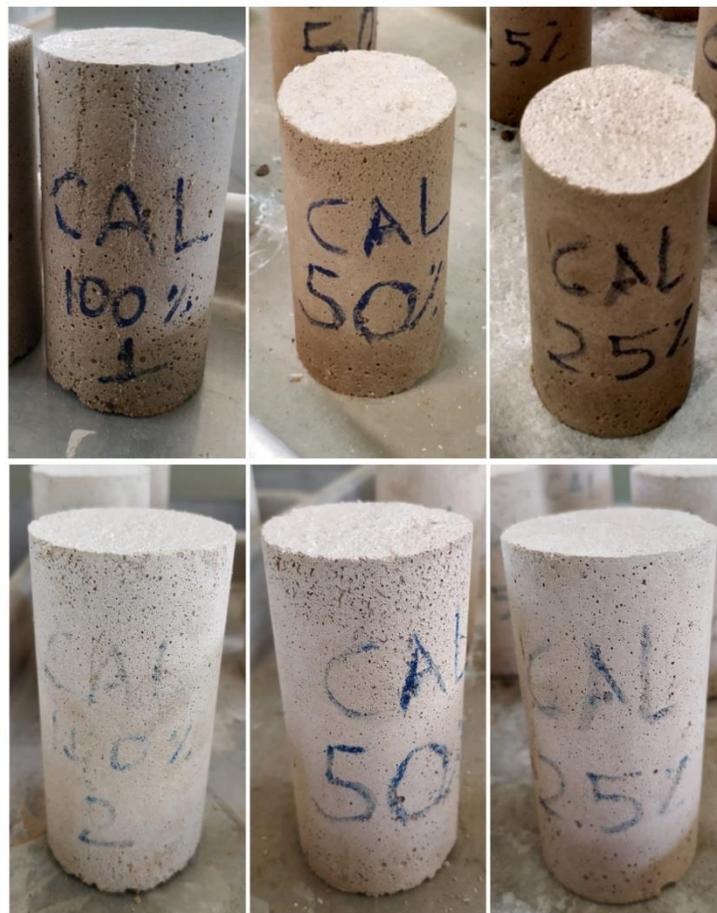


Figura 24 - Corpos de prova após um (acima) e 28 (abaixo) dias de cura

De forma qualitativa, observa-se uma diferença de trabalhabilidade e retenção de água entre as argamassas produzidas logo após a moldagem dos corpos de prova. O F50 apresentou

melhores características quando comparada com o F0 e F75. Outro aspecto analisado foi a rugosidade do corpo de prova após 1 e 28 dias de cura. Aqueles que continham filito se mostraram menos ásperos do que aqueles constituídos totalmente por cal.

4.2.2. Ensaio de compressão

Os resultados do teste de compressão estão representados na Tabela 15. Por uma falha na execução, foi realizado um teste a menos para a substituição F0. Essa falha, porém, não interfere de forma significativa nos resultados obtidos, uma vez que os mesmos se apresentaram relativamente constantes e uniformes.

Tabela 15 - Resultados do teste de compressão

Teste	Força aplicada (kN)	Área (m ²)	Resistência (MPa)	Força aplicada (kN)	Área (m ²)	Resistência (MPa)	Força aplicada (kN)	Área (m ²)	Resistência (MPa)
	F0			F50			F75		
1	0,900	0,002	0,459	1,300	0,002	0,662	1,300	0,002	0,662
2	1,100		0,561	1,200		0,611	1,400		0,713
3	1,100		0,561	1,100		0,561	1,300		0,662
4	1,000		0,510	1,100		0,561	1,200		0,611
5	1,000		0,510	1,100		0,561	1,400		0,713
6	-		-	-		1,200	0,611		1,400
\bar{x}	1,020		0,520	1,167		0,594	1,333		0,679
σ	0,075		0,038	0,075		0,038	0,075		0,038

Os resultados mostram que a substituição parcial da cal em argamassas para revestimento foi satisfatória em ambas as concentrações de substituição, quando se analisa a compressão uniaxial. Para a substituição F50, o aumento foi de 14,4%, enquanto para o F75 o aumento foi de 30,7%. Além disso, os valores de compressão uniaxial das substituições se encontram na faixa aceita para argamassa, equivalente a 0,49 a 1,47 MPa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição parcial da cal pelo filito em seu estado natural se mostrou vantajosa sobre os pontos analisados no trabalho, em especial nos aspectos de resistência à compressão e ambientais. Apesar disso, o trabalho se mostra como um estudo preliminar para a aplicação do material. Sugere-se um estudo das outras propriedades intrínsecas a argamassa.

Da etapa de caracterização tecnológica obteve-se valor de umidade do material igual a 4,23% e composição química constituída basicamente pelos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , o que permitiu classificar o filito como alumino silicato de ferro. Quanto a composição mineralógica, o quartzo, a mica (fengita) e a caulinita foram apontados como os principais minerais constituintes da rocha, o que era esperado. Minerais abaixo do limite de detecção não foram identificados.

O valor de massa específica encontrado é semelhante ao adotado pela literatura para a cal, portanto justifica-se a substituição do mesmo sem que haja consequências negativas no produto. Para as análises térmicas, pode-se dizer que o ganho de massa entre 50 e 200°C está associado a dessorção de água da superfície das partículas. No intervalo entre 400 e 600°C, a perda de massa está associada a desidroxilação da caulinita, se transformando em metacaulinita e o DTA apontou um evento exotérmico.

Os resultados obtidos para área superficial específica refletiram diretamente nas propriedades da argamassa. De forma qualitativa observou-se um aumento na trabalhabilidade da massa nas substituições, em especial na F50, devido ao aumento da coesão. Como não foi alterada a relação água/cimento, não foi possível analisar a influência da área superficial específica na resistência mecânica dos corpos de prova.

Outro aspecto observado foi a diminuição da rugosidade com o aumento da proporção de filito na argamassa. Tal característica se mostra favorável a aplicação do material em argamassas de revestimento. Apesar disso, com o aumento de filito, a argamassa se mostrou mais rosado. Tal situação pode ser malvista por pedreiros e leigos acostumados com a argamassa de cor acinzentada.

A partir da análise dos testes de resistência à compressão, pode-se notar que as argamassas confeccionadas com maior concentração de filito obtiveram resultados mais favoráveis em relação aos demais. Para a substituição F50, o aumento na resistência foi de 14,4%, enquanto

para o F75 o aumento foi de 30,7%. Isso mostra que houve um aumento da atividade pozolânica, favorecendo a resistência do material.

Além desses fatores, a substituição parcial do filito se mostrou favorável nos aspectos ambientais. O processo de calcinação do carbonato de cálcio para obtenção da cal virgem libera de CO_2 na atmosfera. O gás é objeto de estudo de cientistas e apontado como causador dos desequilíbrios climáticos atuais. Além disso, a disposição de estéril em pilhas é um fator preocupante devido aos impactos ambientais, econômicos e de segurança gerados pela construção dessas estruturas. Portanto, nos aspectos ambientais a utilização do filito em seu estado natural em argamassas se faz importante pela redução da emissão do gás CO_2 e minimização da disposição em pilhas de estéril. A agregação de valor econômico ao material é outro fator relevante, uma vez que o mesmo não apresenta atualmente valor econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – UFOP. Ouro Preto, p. 133. 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7215. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16697. **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 9939. **Agregados- Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10007. **Amostragem de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12653. **Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

BAUER, L.A.F. **Material de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 488 p. v. 1.

BARBOSA, D. H. B. M.; SILVA, A. C.; MENDES, M. V.A. **Caracterização granulométrica e automação do método de gaudin através do ImageJ**. In:

ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, 2014. v.10, n.19; p.166.

BERTOLINO, L.C; PALERMO, N.; BERTOLINO, A.V.F.A Geologia. In: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. **Manual De Agregados Para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. Cap. 3, p. 71-84. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1024/1/Cap%203%20Distiller.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2018.

BRASIL. DECRETO Nº 62.934, de 2 de jul. de 1968. **Regulamento do código de mineração**, jul. de 1968. Disponível em: <http://www.dnmpm-pe.gov.br/Legisla/rcm_00.php>. Acesso em: 25 maio 2018

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Estadual - Minas Gerais** / Coord. Marina Marques Dalla Costa *et al.*; Equipe Técnica por Carlos Antônio Gonçalves de Jesus *et al.* – Brasília: DNPM, 2017. 119. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnmp/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/minas-gerais/anuario-mineral-estadual-minas-gerais-anos-base-2010-2014>>. Acesso em: 24 maio 2018.

CARASEK, H.; Argamassas. In: G. C. Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil**. 1ed.São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007. 863-904 p. v. 1.

CARNEIRO, A.M.P. **Revestimento externo em argamassa de cimento, cal e areia: sistemática das empresas de construção civil de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

CEOTTO, L.H.; BANDUK, R.C.; NAKAKURA, E.H. **Revestimentos de Argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação**. Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96 p. v. 1.

HAGEMANN, S. E.; **Apostila de Materiais de Construção Básicos**. [S.l.]: Universidade Aberta do Brasil, 2011. 145 p. v. 2.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (Brasil). **Parecer ief 07/17: análise de proposta de compensação florestal**. Patos de Minas, 2017.

JULIANI, C.; SZABÓ, G. A. **Petrologia Metamórfica: Notas de aula**, 2002. 201 p.

KUCHENBECKER, M.; PEDROSA-SOARES, A. C. O GRUPO BAMBUÍ NA FOLHA LUZ (SE-23-Y-D-V). *Revista Geonomos*, [S.l.], fev 2011. ISSN 24466964. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/71>>. Acesso em: 25 maio 2018

LEMOS, M.G. **Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo**

Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais. 2011. 202 f. Dissertação (Mestrado em Geociências, Área de Geologia e Recursos Naturais) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LEOFANTI, G.; PADOVAN, M.; TOZZOLA, G.; VENTURELLI B. **Surface area and pore texture of catalysts.** In: *Catalysis Today*. [S. l.], v.41, p. 207-219, 1998.

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, 1998.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and Cementitious Materials.** In: *Advances in Concrete Technology*. Ottawa: Taylor & Francis, 1996, v. 1, p. 1-6.

MELO, L.G.A., THAUMATURGO, C. **Filito: um material estratégico para fabricação de novos cimentos.** *Rev. Mil. Cienc. Tecnol.* 2, 10–24, 2012. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_2_tri_2012/RMCT_062_E4B_11.pdf>. Acesso em: 18 abril 2018.

MENDONÇA, F. A. **Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: Alguns indicadores da região Sul.** *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 2, p. 71-86, 2007.

MORAIS, I.S.; MAGALHÃES, L.F.; LARA, L.F.S.; CORRÊA, E.C.S.; MENEZES, E.M.R.O.; AGUILAR, M.T.P.; BEZERRA, A.C.S. **Sericitic Phyllite as Addition in Portland Cement.** In: *Materials Science Forum*, 2018.

NEUMANN, R., SCHNEIDER, C.L., NETO, A.A. **Caracterização Tecnológica de Minérios.** Em: Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., *Tratamento de Minérios*. 4 a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 3, p. 55-109 Disponível em: <<http://www.k2sistemas.com.br/estratigrafiaquimica/artigos/2004/caracterizacao.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2018.

NUNES, D.R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia.** Ouro Preto, 2014.

PATTON, W.J. **Materiais de construção para engenharia civil.** São Paulo: EPU: Ed. Da Universidade de São Paulo, 1978. 366p.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco.** 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de construção.** Porto Alegre: Globo, 1975.

RAGO, F.; CINCOTTO, M.A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas.** São Paulo: EPUSP, 1998. 24 p.

REIS, É. L. **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM – unidade Morro da Mina.** 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

RIBEIRO, A.P.; SOARES, L.; COELHO, A.C.V.; TOFFOLI, S.M.; VALENZUELA DIAZ, F.R. **Caracterização Físico-Química de Filitos Brancos da Região de Itapeva, SP.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 44, São Pedro, 2000. Anais, São Paulo, 2000.

SALES, C. G. **Caracterização Mineralógica e Tecnológica de Minérios.** Universidade do Estado de Minas Gerais, 2009.

SILVA, N.G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006, 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, G. P. et al. **Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito de mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana-MG.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v.36, n.1, p.45-52, 2006.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento.** In: 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2006, Ponta Grossa. Anais do 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2006. v. 1.

SOARES, B. D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica.** 383 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SOARES, L. **Barragem de rejeitos.** In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p. 831-888. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>>. Acesso em: 18 abril 2018

SOUZA, R. B. ; LIMA, F. S. S. ; JOHN, V. M. . **Influência da cal e do filito na cinética de hidratação do cimento.** In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2009, Curitiba. Anais do VIII SBT. Porto Alegre: Antac, 2009.

STACHERA JR, T. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná.** In: International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies:, 2007, MACEIO. IC-NOCMAT 2007, 2007.

ZYL, V. D. Mine waste disposal. In: Daniel D.E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal.** Chapman & Hall, Londres, 1993. cap 12.

WINGE, M. **Petrologia Metamórfica:** Disciplina Petrologia metamórfica, 1996. Notas de aula.

ANEXO B – Gráfico B.E.T.

