



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

MAISA CRISTINA DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA DO
QUARTZITO FRIÁVEL PROVINIENTE DA MICRORREGIÃO DO
PLANALTO DE ARAXÁ**

ARAXÁ/MG

2018

MAISA CRISTINA DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA DO
QUARTZITO FRIÁVEL PROVINIENTE DA MICRORREGIÃO DO
PLANALTO DE ARAXÁ**

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 Minas

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

ARAXÁ/MG

2018

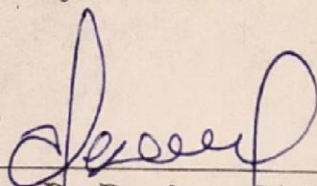
FOLHA DE APROVAÇÃO

MAISA CRISTINA DE SOUZA

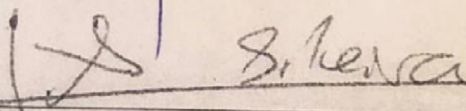
**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA DO
QUARTZITO FRIÁVEL PROVINIENTE DA MICRORREGIÃO
DO PLANALTO DE ARAXÁ**

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

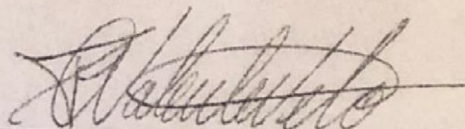
Araxá, 03 de julho de 2018.



Presidente e Orientador: Dr. Domingos Sávio de Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



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



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

DEDICATÓRIA

*A minha mãe, Vanilda,
por sempre apoiar meus sonhos e
confiar em meu potencial.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda força que me concedeu para realizar esse sonho, pelas bênçãos em minha vida, por ter iluminado todo o meu trajeto.

Aos meus pais, Antônio e Vanilda, por todo amor, dedicação e renúncias que fizeram durante essa longa caminhada para que eu pudesse concretizar um sonho. Tenho certeza que sem eles e seus conselhos e ensinamentos não chegaria até aqui.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam nessa jornada, me ajudando e tornando meus dias mais alegres.

Ao meu orientador Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende, pela orientação, atenção e paciência. Ao professor Hildor Seer pela disponibilidade e ajuda.

Aos técnicos de laboratório do CEFET-MG pela disposição em ajudar na realização dos testes.

A todos que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho fosse realizado. Essa conquista é nossa.

EPÍGRAFE

*Só se pode alcançar um grande êxito
quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

No âmbito industrial a necessidade de aquisição de uma fonte de matéria prima local de boa qualidade é recorrente, esse problema também atinge as indústrias de mineração e de produção cerâmica. A descoberta de uma nova fonte de insumos próxima as vias de produção é uma vantagem competitiva no mercado, pois pode vir a reduzir os custos de processamento. As matérias-primas utilizadas na produção de revestimento cerâmico devem conter argilominerais, caulinita, ilita e os minerais não plásticos como feldspatos, carbonatos, talco e quartzo. A proporção entre os minerais presentes nas massas é a principal responsável pelas fases cerâmicas formadas na queima do revestimento, além das condições de queima e do tamanho das partículas no produto. Junto às condições de processamento, a composição mineralógica influencia diretamente na propriedade do produto acabado. Este trabalho teve como objetivo caracterizar e comparar quartzito alterado proveniente do distrito de Alpercatas próximo ao município de Perdizes/MG, para possível incorporação como matéria prima na rota de produção da indústria de revestimento cerâmico. O quartzito foi submetido à caracterização física, química e mineralógica. Após a caracterização foram determinadas as propriedades físicas e químicas do mesmo. Foi avaliada também, a título de comparação, a possibilidade de inserção desse material no processamento de revestimento cerâmico. Os resultados evidenciaram que o material estudado possui características químicas refratárias necessárias para ser incorporado por indústrias cerâmicas.

Palavras-chave: matéria prima, quartzito, revestimento, cerâmica.

ABSTRACT

In the industrial scope, the need of acquiring a good quality local raw material of is recurrent, this problem also affects the mining and ceramic production industries. Finding a new inputs source near the production lines is a competitive advantage in the market, because it can reduce processing costs. The raw materials used to produce ceramic coatings must contain clay minerals, kaolinite, illite and non-plastic minerals such as feldspars, carbonates, talc and quartz. The proportion among the minerals which compound the masses is the main factor responsible for the ceramic phases formed in the coating burning (formed during the act of burning the coating), in addition to the burning conditions and the size of the product particles. Together with the processing conditions, the mineralogical composition influences directly the finished product propriety. This work aims to characterize, compare and evaluate the altered quartzite from the district of Alpercatas, for evaluating its possible incorporation as a raw material in the production route of the ceramic coating industry. The altered quartzite was submitted to physical, chemical and mineralogical if indeed happened characterization. After that, were determined the physical and chemical properties of the quartzite. Was also evaluated, as matter of comparison, the possibility of incorporating this material in the ceramic coating processing. The results showed that the studied material possess the necessary refractory characteristics to be incorporated by the ceramic industries.

Keywords: raw material, quartzite, coating ,ceramic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1:Esboço Tectônico do Brasil..... | 19 |
| Figura 2- Mapa Geológico de Minas Gerais | 20 |
| Figura 3- Coluna Estratigráfica dos grupos Canastra e Ibiá na região de Ibiá..... | 22 |
| Figura 4: Exemplo de exploração do quartzito na região de Ouro Preto, por bancos e blocos irregulares Pires (2007)..... | 24 |
| Figura 5: Caulim..... | 30 |
| Figura 6: Feldspato potássico..... | 31 |
| Figura 7: Quartzo..... | 33 |
| Figura 8: Classificação dos materiais cerâmicos de acordo com sua aplicação..... | 35 |
| Figura 9: Difratoograma de raio X da massa cerâmica..... | 40 |
| Figura 10: Difratoograma de raio X do quartzito..... | 41 |
| Figura 11:Difratoograma do quartzito (A) e da massa cerâmica (B) respectivamente..... | 41 |
| Figura 12: Ponto de coleta do Quartzito..... | 43 |
| Figura 13: Lupa Binocular..... | 44 |
| Figura 14:Ilustração do ensaio do limite de plasticidade. https://www.teconconcursos.com.br/conteudo/questoes/94521 | 45 |
| Figura 15:Amostra na capsula de porcelana e água destilada para realização do ensaio de Liquidez..... | 46 |
| Figura 16: Ensaio Limite de Liquidez no aparelho Casagrande..... | 47 |
| Figura 17:Ensaio Limite de Liquidez no aparelho Casagrande, após os golpes..... | 47 |
| Figura 18:Amostra colocada na mufla..... | 48 |
| Figura 19:Detalhe do local de extração a amostra..... | 51 |
| Figura 20: Imagem da região de onde foi coletado o Quartzito..... | 52 |
| Figura 21: Mapa Geológico da região de onde foi coletado o Quartzito, Grupo Canastra..... | 52 |
| Figura 22: Perfil Geológico da região de onde foi coletado o Quartzito, Grupo Canastra..... | 53 |
| Figura 23 :Amostra do quartzito alterado..... | 54 |
| Figura 24: Amostra vista através da lupa binocular, com aumento de 20X..... | 55 |
| Figura 25: Curva Granulométrica do Quartzito..... | 56 |
| Figura 26: Cilindro para o ensaio de limite de plasticidade..... | 57 |
| Figura 27: Gráfico de DRX..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 28: Visão Geral do Quartzito (MEV)..... | 61 |
| Figura 29: Visão detalhada do Quartzito (MEV), letra M representa a Muscovita e a letra Q o Quartzito. Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG..... | 61 |
| Figura 30: Buracos deixados no agregado cristalino. | 62 |
| Figura 31: Camadas formadas pelas muscovitas. | 62 |
| Figura 32: Muscovita em meio aos cristais. | 63 |
| Figura 33: Zoom da estrutura da muscovita. | 63 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|---|----|
| Tabela 1– Valor da produção nacional dos diversos setores cerâmicos. | 36 |
| Tabela 2 – Características segundo a norma EN 159 e valores dos produtos encontrados no mercado. | 37 |
| Tabela 3- Composição química de matérias-primas empregadas na fabricação de revestimentos. | 37 |
| Tabela 4- Resultado da análise química por FRX das matérias primas | 39 |
| Tabela 5- Composição química das matérias primas..... | 40 |
| Tabela 6– Diâmetros D10, D50 E D90 da amostra de quartzito. | 55 |
| Tabela 7: Resultado do teste de Limite de liquidez | 57 |
| Tabela 8 – Ensaio de Perda ao Fogo..... | 58 |
| Tabela 9 - Elementos presentes na composição do Quartzito alterado..... | 59 |
| Tabela 10 – Composição química dos óxidos obtida pela espectrometria de fluorescência de raio-x. | 59 |
| Tabela 11 – Comparação entre os quartzitos utilizados na bibliográfica e o quartzito alterado. | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANFACER - Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos

BH – Belo Horizonte

CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

cm – centímetro

EDS – Difração de Raios-X

Fb – Fator Brookfield

g- grama

g/cm³ - grama por centímetro cúbico

h – hora

IP - Índice de Plasticidade.

Kg- quilograma

Km – quilômetro

LL - Limite de Liquidez.

LP - Limite de Plasticidade.

Ltda – Limitada

MEV/SEM – Microscopia Eletrônica de Varredura

min – minuto

MG – Minas Gerais

ml – mililitro

mm – milímetro

MPa – megapascal

mS - mili Siemens

NBR – Norma Brasileira

NP – Não apresenta limite de Plasticidade.

NL – Não apresenta limite de Liquidez.

PF - Perda ao fogo

PIB - Produto Interno Bruto

°C – grau Celsius

s – segundo

t – tonelada μm - micrômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

% - porcentagem

~ - aproximadamente

θ – theta

\pm - Mais ou menos (erro variável)

Al- alumínio

Al_2O_3 – óxido de alumínio – alumina

Ca – cálcio

CaO – óxido de cálcio – cal

Ca(OH)_2 – hidróxido de cálcio

Ca^{2+} - íons de cálcio

CO_2 – dióxido de carbono

Fe_2O_3 – óxido de ferro (III) ou óxido férrico

H_2O – água

MgO – óxido de magnésio

O - oxigênio

OH^- - hidroxila

Si - silício

SiO_2 – dióxido de silício – sílica

SO_3 – trióxido de enxofre

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|--------------------------------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 18 |
| 3.1 | Aspectos geológicos | 19 |
| 3.1.1 | Grupo canastra..... | 20 |
| 3.1.2 | Quartzito..... | 22 |
| 3.2 | Lavra..... | 23 |
| 3.3 | Caracterização | Erro! Indicador não definido. |
| 3.4 | Matérias primas cerâmicas..... | 28 |
| 3.4.1 | Argilas..... | 29 |
| 3.4.2 | Caulim..... | 30 |
| 3.4.3 | Feldspatos..... | 31 |
| 3.4.4 | Filito..... | 32 |
| 3.4.5 | Talco | 33 |
| 3.4.6 | Quartzo..... | 33 |
| 3.5 | Processamento materiais cerâmicos | 34 |
| 3.5.1 | Indústria de cerâmica nacional | 35 |
| 3.5.2 | Considerações sobre cerâmicas para revestimentos | 36 |
| 4 | Metodologia | 43 |
| 4.1 | Coleta e preparação de amostras | 43 |
| 4.3 | Caracterização Física..... | 43 |
| 4.3.1 | Análise tátil visual | 44 |
| 4.3.2 | Análise granulométrica | 44 |
| 4.3.3 | Limite de Plasticidade..... | 45 |
| 4.3.4 | Limite de Liquidez..... | 45 |
| 4.4 | Caracterização química..... | 48 |
| 4.4.1 | Perda ao Fogo..... | 48 |
| 4.4.2 | Espectrometria de Fluorescência de Raios X..... | 49 |
| 4.4.3 | Difração de Raios X..... | 50 |
| 4.4.4 | Microscopia Eletrônica de varredura – MEV | 50 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.1 | Coleta das amostras | 51 |
| 5.2 | Caracterização mineralógica | 51 |
| 5.3 | Análise Tátil Visual | 54 |
| 5.4 | Análise granulométrica | 55 |
| 5.5 | Limite de Plasticidade | 56 |
| 5.6 | Limite de Liquidez | 57 |
| 5.7 | Caracterização química | 58 |
| 5.7.2 | Perda ao Fogo | 58 |
| 5.7.3 | Espectrometria de Fluorescência de Raios X | 58 |
| 5.7.4 | Difração de Raios X | 60 |
| 5.7.5 | Microscopia Eletrônica de varredura – MEV | 60 |
| 6 | CONCLUSÕES | 66 |
| | REFERÊNCIAS | 68 |

1 INTRODUÇÃO

Minas Gerais é o estado que possui o maior número de minerações de quartzitos no país, grande parte dessas produções é destinada a utilização do quartzito como rocha ornamental e de revestimento. Outro estado que também possui muitas produções é o Espírito Santo, ambos localizados na região sudeste do país.

Atualmente no processo de criação e consolidação de indústrias, observa-se um aumento da competitividade resultando além de uma melhora na qualidade dos produtos a tentativa de diminuição dos custos referentes a produção. A diminuição no custo de transporte, por exemplo, evidencia a necessidade e importância da descoberta de novas fontes de matérias primas próximas a linha de produção, detalhe que pode se transformar em uma vantagem competitiva dentro do mercado. A aquisição de uma nova fonte de matéria prima levando a diminuição dos custos produtivos também é uma variável importante dentro do processo de produção de cerâmicas de revestimento. Segundo Dana (1976) os materiais de revestimento possuem máxima estabilidade dimensional durante queima, com valores de retração praticamente nulos e porosidade compreendida entre 3 e 18%. As matérias-primas utilizadas na produção de revestimento devem conter argilominerais, caulinita, ilita e os minerais não plásticos como feldspatos, carbonatos, talco e quartzo. A proporção entre os minerais presentes nas massas é a principal responsável pelas fases cerâmicas formadas na queima do revestimento, além das condições de queima e do tamanho das partículas no produto. Conseqüentemente, junto às condições de processamento, a composição mineralógica influencia diretamente a propriedade do produto acabado (BARBA *et al*, 2002).

Os quartzitos são rochas formadas através de processos metamórficos, apresentam granulação fina a média, com alto grau de recristalização, estruturalmente maciços a laminados, compostos basicamente de quartzo. O quartzo é considerado uma matéria prima indispensável à composição da massa cerâmica. Pode ser encontrado em abundância na crosta terrestre e nas rochas está associado principalmente com o feldspato e a muscovita. O quartzo pode apresentar traços de lítio, sódio, potássio, alumínio, ferro férrico, manganês bivalente e titânio, possuindo propriedades físicas constantes. Tem como fórmula química SiO_2 com composição química de 46,7 % de Si e 53,3% de O (DANA, 1976).

O principal uso desses quartzitos é como rocha de revestimento decorativo externo e interno e calçamentos, mas seu uso em mosaicos ornamentais também está se estendendo e possui grande valor agregado. Por possuir em sua composição o quartzo, o quartzito pode também ser utilizado com uma das matérias primas para as produções cerâmicas.

As matérias-primas usadas nas formulações cerâmicas assumem, em geral, configurações mineralógicas distintas e cada uma exerce uma função própria e específica: as matérias-primas argilosas conferem plasticidade à massa, enquanto as não-plásticas, caracterizadas por minerais fundentes e refratários são responsáveis respectivamente pela densificação e da resistência mecânica do material (OLIVEIRA,1998).

Durante a queima no processo cerâmico, o quartzo se dissolve parcialmente na fase líquida e uma nova fase cristalina se forma a mulita. O produto queimado é constituído de uma matriz vítrea, na qual partículas de mulita e as partículas de quartzo que não se dissolveram totalmente estão dispersas (SANCHEZ, 2001).

Tendo em vista os benéficos às indústrias de cerâmica locais, como a aquisição de uma nova fonte de insumo, e um acréscimo ao desenvolvimento econômico local, como geração de novos empregos, o objetivo do trabalho foi caracterizar o quartzito proveniente do distrito de Alpercatas, visando a possível incorporação do mesmo como matéria prima para a indústria cerâmica, substituindo assim o quartzo na mistura. Como objetivos específicos foram realizadas a análise da composição química, das propriedades físicas, da morfologia, da estrutura cristalina e verificada a viabilidade da incorporação do quartzito estudado na indústria cerâmica.

Neste trabalho são apresentados dados que qualificam o quartzito, a partir do levantamento geológico-estrutural, dos estudos petrográficos, além da caracterização tecnológica a partir de ensaios físicos e químicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A muito tempo que a história dos homens e das rochas estão correlacionadas, quando se iniciou o uso das rochas como adornos, por volta de 4000 a.C., o conceito de rocha ornamental foi então formado. Primeiramente o consumo das rochas estava ligado a disponibilidade local, mas com o passar do anos em decorrência de políticas expansionistas dos antigos impérios as rochas passaram a ser transportadas de uma região a outra, e com distâncias cada vez maiores (COSTA, 2002).

De acordo com Rocha (1984) no Brasil os registros mais antigos de construções utilizando rochas remetem ao período colonial, elas eram geralmente utilizadas para confecção de degraus, mesas e bancos. A primeira exploração de jazida do país ocorreu devido a uma maior dificuldade de importação de mármore europeus no período da 1ª Guerra Mundial (1914-1918), no estado de Minas Gerais em uma cidade chamada Mar de Espanha. Com essa tentativa outras foram surgindo nos demais estados.

Segundo Villela (2003), a técnica de utilização do quartzito chegou ao Brasil em meados do século XVI, a utilização do quartzito era incentivada porque a rocha atuava tanto como elemento estrutural quanto de ornamentação, atendia bem as duas proposições.

Nos dois séculos seguintes o quartzito foi amplamente empregado nas construções civis, militares e religiosas brasileiras. A chegada de D. João VI no início do século XIX, marcou o início da queda na demanda de utilização do quartzito nas construções, devido as influências de um novo estilo arquitetônico, o neoclássico. Villela (2003) afirma que a partir desse período o material foi ficando restrito a pavimentação das ruas, pisos, degraus de escadas e revestimento de paredes, em forma de placas.

Atualmente segundo a Abirochas (2006) os dois principais produtores e exportadores nacionais de rochas ornamentais são os estados do Espírito Santo e Minas Gerais. Com uma média de produção de 1,2 milhões de toneladas/ano, Minas Gerais possui cerca de 160 frentes de lavra de rocha ornamental, presente dentro dessa produção encontra-se a extração de quartzitos, 300 mil toneladas/ano. Aproximadamente 6000 empregos diretos são gerados nos processos de lavra e beneficiamento desse material (ABIROCHAS, 2003).

No estado de Minas Gerais e no Brasil a produção de quartzitos foliados e de ardósias tem crescido significativamente, demonstrando um perfil competitivo para as rochas comercializadas no mercado externo. Minas Gerais exporta 87,5% do valor total da exportação nacional desse material (ABIROCHAS, 2003).

2.1 Aspectos geológicos

A região onde foi recolhida a amostra que foi caracterizada localiza-se no cinturão de dobramentos da borda ocidental do Cráton São Francisco, denominada Faixa Brasília (Figura 1). A Faixa Brasília engloba porções dos estados de Goiás, Distrito federal, Tocantins e Minas Gerais e possui uma extensão de mais de 1000 km na região central do país (Almeida, 1967).

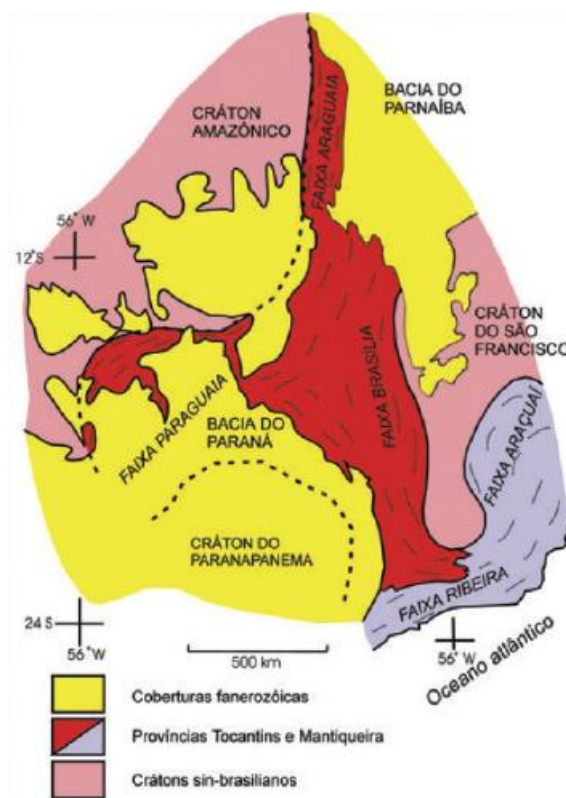
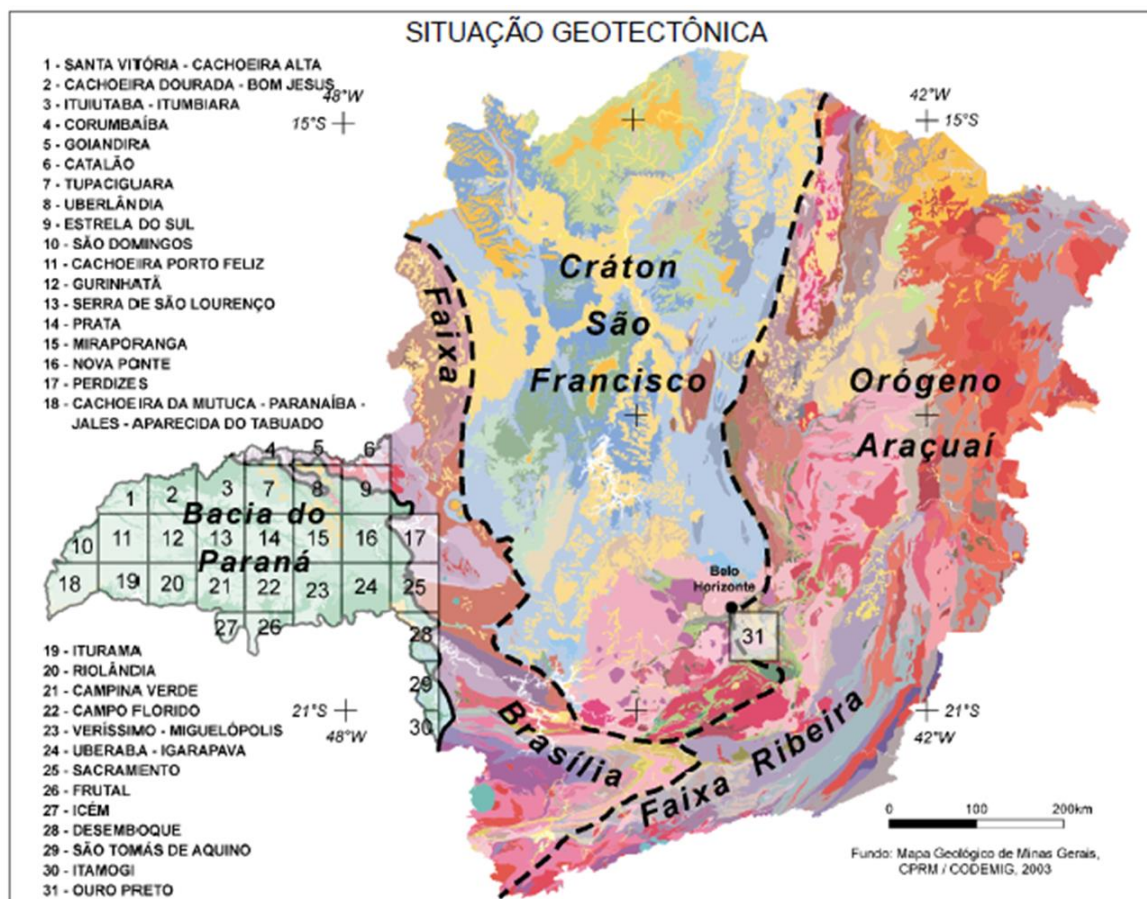


Figura 1: Esboço Tectônico do Brasil.
 Fuck *et al.* (1994).

A Zona Externa é uma das seções distintas pela divisão da Faixa Brasília Meridional situando-se à borda do Cráton São Francisco. É composta por unidades metassedimentares dos grupos Paranoá, Canastra, Vazante e Ibiá. (Fuck *et al.*, 1994). A outra seção, Zona Interna, possui característica mais metamórfica e é composta pelas rochas do Grupo Araxá.

A figura 2, ilustra a formação geológica da Faixa Brasília dentro do mapa político de Minas Gerais.



**Figura 2- Mapa Geológico de Minas Gerais
CODEMIG (2017)**

O Grupo Canastra é um conjunto de intercalações de filitos e quartzitos com espessura geralmente intermediária. A espessura das rochas apresenta variação relevante na região norte, onde encontram-se os chapadões extensos, e na região sul onde possivelmente ocorreu um encurtamento crustal por força tectônica de compressão (SEER, 1999). De acordo com Pereira (1992) e Campos-Neto (1984) o Grupo Canastra apresenta uma espessura de 2000 m. O conjunto demonstra uma sucessão que se inicia por filitos e que apresenta um aumento progressivo de contribuição arenosa passando a quartzo-filitos, quartzitos micáceos, quartzitos e finalmente aos ortoquartzitos que sustentam as escarpas das serras e os chapadões. Cada sucessão mostra uma variação lateral e vertical entre pacotes filitos e quartzitos. Cada pacote também apresenta uma mesma variação interna só que em escala menor (PEREIRA *et al*, 1992).

Quanto a coloração os filitos e quartzo-filitos apresentam cor prateada quando frescos e tons avermelhados quando sofrem ações do intemperismo. Quanto a granulometria, em geral, os quartzitos apresentam de fina a média. (PEREIRA, 1994).

A composição mineralógica de todas as rochas é bastante semelhante, o que diferencia é a porcentagem de quartzo e filossilicatos. A essência mineralógica gira em torno de quartzo, sericita, muscovita, clorita e plagioclásio. A granocrescência ascendente é uma das características mais importantes do Grupo Canastra, pode ser observada na gradação dos estratos argilosos da base, até estratos arenosos do topo (SEER, 1999).

A figura 3 demonstra um esquema que demonstra a granocrescência ascendente e a divisão do Grupo Canastra que é sobreposto por discordância erosiva pelas rochas do Grupo Ibiá, no topo observa-se uma menor distribuição granulométrica denominada unidade superior da Formação Serra da Batalha, formada por filito, quartzo filito e quartzito micáceo. Chegando ao topo passa a dominar os quartzitos, médios a grossos, denominada Formação Serra da Batalha (inferior). Próximo a base mostra um pacote basal (Formação Paracatu) com predomínio de filitos e quartzitos micáceos em relação aos quartzitos médios. Esses filitos podem ser sericíticos ou carbonosos, com intercalações de lentes de formação ferrífera (SEER, 1999).

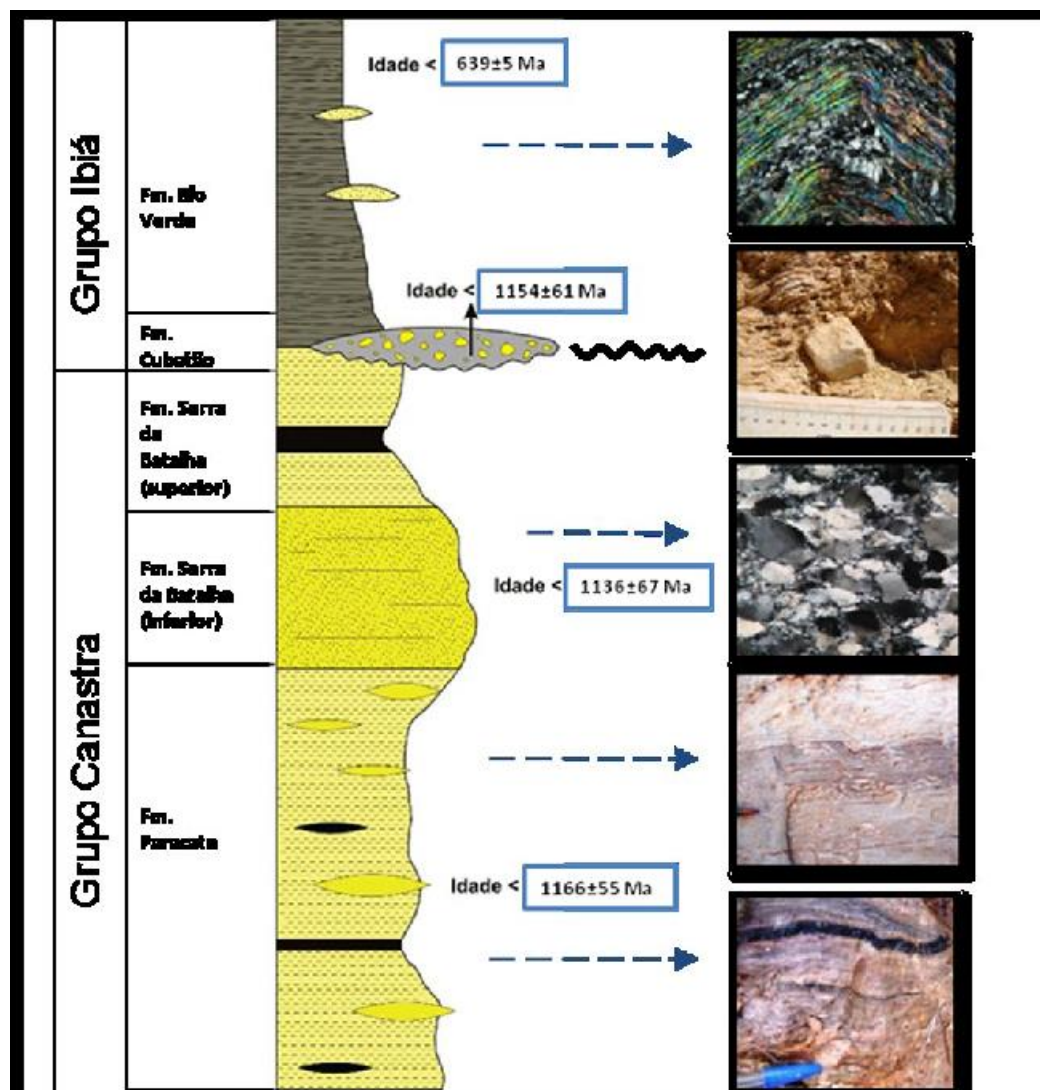


Figura 3- Coluna Estratigráfica dos grupos Canastra e Ibiá na região de Ibiá.

Dias (2011).

2.1.1 Quartzito

A origem dessa rocha está associada a processos metamórficos sofridos por rochas de origem sedimentar e que também são ricas em quartzo, como os arenitos e cherts. Portanto é uma rocha metamórfica que é composta quase que totalmente de grãos de quartzo.

A transformação em quartzito através dos arenitos acontece a alta pressão e temperatura, quando devido a movimentos tectônicos os arenitos são postos em zonas profundas da terra. Os grãos de quartzo do arenito recristalizam-se nesse caso e os restos dos sedimentos da rocha original somem, dando origem a rocha metamórfica quartzito.

É muito comum a presença de mica na constituição dos quartzitos, esse fato revela a existência de uma matriz argilosa nos arenitos (PEREIRA *et al*, 1992). Quase sempre se

mostra compacta, de alta resistência e apresenta cores pouco variáveis. Por possuir pouca variabilidade com relação às cores, alguns quartzitos são muito valorizados por apresentarem tal distinção dos demais. Os quartzitos azuis (quartzitos com dumortierita) e os quartzitos de cor verde (quartzitos com fuchsite), são exemplos (PERSON, 1946).

Qualidades dos quartzitos:

- Alta resistência mecânica;
- Antideslizante (antiderrapante);
- Resistência ao aquecimento do sol;
- Alta resistência à ação de produtos químicos.

Usos mais comuns dos quartzitos:

- Colunas e bases de construções históricas;
- Revestimento decorativo de fachadas e paredes internas e externas;
- Construção de pisos internos e externos de alta resistência;
- Construção de mesas e objetos de adorno de alto valor;
- Material para artesanato mineral e indústria de bijuterias;
- Material abrasivo para preparação de instrumentos de corte;
- Matéria prima para a indústria siderúrgica (fundente à base de sílica);
- Fonte de sílica para usos diversos.

2.2 Lavra

A lavra ocorre a céu aberto e é feita através de bancos onde os blocos que apresentam qualidade superior são extraídos, cortados e lançados para baixo, quando são divididos em pedras de revestimento (PIRES, 2007). O corte ocorre através de técnicas primárias e usa esporadicamente pequenas quantidades de pólvora (Figura 4).



Figura 4: Exemplo de exploração do quartzito na região de Ouro Preto, por bancos e blocos irregulares Pires (2007).

As pequenas lavras, denominadas artesanais, após determinada a área de interesse são classificadas de acordo com alguns parâmetros como a textura, cor e proximidade da superfície. O trabalho é feito pelo método de extração manual obtendo-se duas faces livres da superfície da rocha, aproveitando-se dos planos de fraturas presentes no depósito e utilizando-se de alavancas, cunhas e marretas (PIRES, 2007). O método de separação do bloco é muito minucioso e realizado de forma vagarosa, com o uso de cunhas e golpes de marretas a separação das placas é feita até a obtenção do produto final, as lajotas.

Outro método de extração, denominado misto, após a determinação da área e remoção do capeamento são feitos furos para a inserção de explosivos, geralmente dinamite (CURI, 2002). Após a explosão os blocos são trabalhados manualmente e os produtos finais obtidos de maneira semelhante a anterior.

O último método de extração é o mecanizado onde a operação de limpeza da área em que será lavrada e remoção de solo ou rochas alteradas presentes é feita por trator de esteiras e carregadeira. Posteriormente é feita a furação dos blocos por perfuração pneumática, geralmente são feitos furos que atingem de 5m até 15m de profundidade e diâmetro de 3". Os blocos extraídos inicialmente são classificados como estéreis e são removidos para dar

sequência à lavra. O desmonte consiste na detonação de uma única linha de furos espaçados de 4 m entre si, com afastamento de 3,5 m da face da rocha (PIRES, 2007).

Posteriormente ao processo de detonação descrito, a extração das lajotas é similar ao método artesanal. Em todos os três métodos, os impactos ambientais sobre o solo, vegetação, fauna, estética do depósito de estéril e a área lavrada são semelhantes, porém com proporções distintas.

Segundo Frazão e Paraguassu (1998), a inserção desses materiais na indústria de construção civil pode acontecer de várias formas e aplicações, como por exemplo:

- Pedra britada, pedrisco, areia artificial, pó de pedra, seixos e areia natural para uso em concreto hidráulico e betuminoso, como filtros e transições em barragens de terra e de enrocamento, como lastro em ferrovias, estradas, aeroportos, etc.;
- Placas de pedra para revestimento de paredes e pisos;
- Blocos de rocha utilizados como elementos estruturais tais como, muros de arrimo, proteção de encosta, na forma de enrocamento, etc.

Um dos desafios atuais da indústria de rochas ornamentais no país é o investimento em pesquisa e otimização dos processos para que os impactos ambientais gerados nas etapas de lavra e beneficiamento sejam minimizados. O tratamento e aproveitamento de resíduos gerados pelo beneficiamento se mostra como uma oportunidade de transformar custo em lucro, ou pelo menos diminuição de despesas, como por exemplo o valor que os aterros industriais consomem.

Além da utilização dos resíduos gerados o quartzito que muitas vezes é encontrado de forma a apresentar alterações e granulometria tipo silte e areia também pode ser incorporado em outros processos industriais. Visando esse tipo de incorporação, a caracterização desse tipo de quartzito alterado foi realizada afim de determinar possibilidade de introdução do mesmo como matéria prima em outros processos industriais, como por exemplo a produção de massa cerâmica.

Primeiramente foi determinado em que tipologia de matéria prima o material se adéqua e posteriormente um cenário de incorporação industrial foi indicado.

2.3 Métodos Analíticos

Para inserção de qualquer tipo de matéria prima na rota de produção cerâmica, como o quartzito, análises físicas e químicas devem ser realizadas. A composição de uma peça cerâmica e as suas especificidades são determinadas através da natureza e da quantidade dos

minerais ou compostos químicos constituintes, além de outros parâmetros singulares da matéria-prima como a granulometria, o comportamento térmico e o comportamento em presença de água.

Existem dois tipos de métodos para se realizar a análise, os químicos e os físicos. Os métodos químicos são feitos por meios de reações de precipitação seletiva e reações de formação de complexos corantes. Os métodos físicos podem ser através de espectrofotometria ou ainda por fluorescência de raios-X.

Fluorescência de raios-X

Caracterizado como um método preciso, não destrutivo e rápido, a fluorescência de raios-X é frequentemente utilizada para determinar a composição química em materiais cerâmicos nos dias atuais.

Segundo Más (2002) a interpretação da análise química de uma matéria-prima argilosa pode ser descrita abaixo:

- Óxido de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O): por serem fundentes fornecem resistência mecânica quando sinterizados entre 950 e 1000°C; comumente encontrados na forma de feldspatos.
- Óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO): necessitam de moagem e a temperatura de sinterização é de aproximadamente a 1100°C, caracterizados como fundentes e com tendência a diminuição da refratariedade das peças, a presença de calcita, dolomita e massas calcárias são indicadas;
- Sílica ou óxido de silício (SiO_2): indica a presença de silicatos e sílica livre, em sua maior parte combinada, formando os argilominerais;
- Óxido de ferro (Fe_2O_3): reduz a plasticidade e a retração, a secagem é mais simples. É responsável, em grande parte das argilas, pela coloração vermelha ou amarelada.
- Óxido de titânio (TiO_2): desvio de cor para um tom alaranjado;
- Óxido de enxofre (SO_3): possibilidade de indicação de existência de gesso;
- Óxido de manganês (MnO_2): alteração da cor para marrom;
- Carbonatos: auxiliam no branqueamento das peças, em uma menor expansão e uma maior porosidade;

Perda ao fogo

A perda ao fogo, consiste na diminuição de peso, até atingir um valor constante, demonstrando uma perda de material devido ao aumento de temperatura. Indica o teor de

matéria orgânica no material e a quantidade de gás e vapor formados durante o processo de aquecimento, originados da decomposição dos carbonatos.

O ensaio de perda ao fogo é determinado com base na norma brasileira NBR NM 18 – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Este ensaio estabelece a perda de massa após o aquecimento. Esta perda refere-se, em grande parte, ao dióxido de carbono presente no fíler calcário, sendo que este ensaio serve como parâmetro de estimativa do teor desta adição. Outra parcela da perda ao fogo refere-se à perda de água do gesso através do processo de evaporação. Um valor elevado de perda ao fogo caracteriza hidratação avançada e desaconselha sua utilização.

Difração de raios-X

A difração de raios-X permite a identificação dos minerais constituintes além de possibilitar o estudo das características cristalográficas destes minerais.

Para caracterizar argilominerais, a utilização de difração de raios-X é ainda mais indicada, pois reportaria os elementos químicos presentes no material. A caracterização químico-mineralógica do material e a determinação das propriedades que seus componentes atribuem às massas cerâmicas permitem estudar e determinar os beneficiamentos que devem ser realizados para alterar uma ou várias propriedades do corpo cerâmico, e melhorar as propriedades do produto final.

Análise térmica diferencial

A análise térmica diferencial (ATD) é uma das técnicas de análise térmica e tem como função indicar através de picos endotérmicos ou exotérmicos a comprovação da existência de minerais essenciais que influenciam as propriedades finais da peça (SANTOS, 1989).

Análise termogravimétrica

Outra técnica muito utilizada é a análise termogravimétrica (TGA) que determina a perda ou ganho de massa que uma amostra sofre em função da temperatura e /ou tempo. A amostra é aquecida de maneira controlada, até uma temperatura pré-determinada. Este método de análise complementa a análise térmica diferencial por fazer distinção entre as reações onde ocorre perda de massa e as reações onde não ocorre.

Análise granulométrica

Na análise granulométrica não se pretende mais do que analisar o tamanho das partículas de uma determinada amostra e a forma como elas se distribuem nessa mesma amostra. É necessário determinar as dimensões das partículas individuais e estudar a sua distribuição, pelo peso de cada classe dimensional considerada, pelo seu volume, ou ainda pelo número de partículas integradas em cada classe. Uma das técnicas mais utilizadas atualmente é através do Espalhamento de Luz Laser de Baixo Ângulo - LALLS (*Low Angle Laser Light Scattering*).

2.4 Matérias primas cerâmicas

Por possuir uma grande quantidade de matéria prima para sua fabricação e as mesmas serem facilmente extraídas a cerâmica é, além de um importante objeto de estudo sobre a história de inúmeras civilizações, uma das atividades industriais mais antiga no mundo.

Cerâmicas ou materiais cerâmicos portanto compreendem uma gama de materiais necessários a engenharia e que geralmente passa a ter utilização após um processo de tratamento térmico, possuem fases formadas por componentes metálicos e não metálicos e devido as diversas combinações e arranjos na estrutura atômica existe uma infinidade de fases cerâmicas (CAVALCANTE, 2005).

Estas características de arranjo estrutural fazem com que os materiais cerâmicos tenham determinadas propriedades físico-químicas tais como: elevada rigidez, dureza mecânica, alta fragilidade, alta temperatura de fusão, alta resistência à abrasão e elevada resistência ao calor. São então empregados em tijolos, refratários, dispositivos eletrônicos, fibras, louças, componentes aeroespaciais e abrasivos por possuírem tais propriedades mecânicas e físicas. E se diferem das demais classes de materiais por apresentarem alta dureza e elevada temperatura de fusão dentre suas características (ALBUQUERQUE, 2009).

As cerâmicas classificadas como tradicionais, cuja obtenção advém de insumos naturais, são aquelas que englobam produtos à base de silicatos, e as cerâmicas avançadas que englobam os materiais cerâmicos de alto desempenho e são obtidas a partir de óxidos, nitretos, carbonetos e boretos (CAVALCANTE, 2005).

Os fatores a serem analisados para a escolha das matérias primas incorporadas a produção cerâmica são: composição química, pureza, tamanho e distribuição do tamanho das partículas, cor de queima, reatividade, potencialidade de extração e custos.

De acordo com Albuquerque (2009) o tipo de cerâmica que deseja-se produzir a combinação e as proporções desses materiais iram se alterar, já que a atuação de cada mineral no processo produtivo é singular. Além da água e aditivos a composição da massa cerâmica também contém matérias primas plásticas e não-plásticas. Aditivos são um tipo de incremento no processamento da massa cerâmica ou de suas propriedades finais. A água aumenta a plasticidade e a tenacidade da massa e também simplifica o processo de moldagem. As plásticas são indispensáveis no processo de conformação, acrescentando qualidade mecânica. Como exemplo no processo de fabricação, segundo (ALBUQUERQUE, 2009):

- Argilas plásticas (queima branca ou clara)
- Argilas fundentes (queima vermelha)
- Caulim

Por sua vez os materiais não-plásticos objetivam reduzir o encolhimento da argila ao secar e decrescer a temperatura de vitrificação da massa por isso são chamados de materiais fundentes. Destacam-se

- Filitos
- Feldspatos
- Talco
- Carbonatos

Conforme Van Vlack (1973), outras matérias-primas também são diretamente usadas nos processos de conformação para obtenção de materiais cerâmicos para revestimento, tais como: calcário, quartzo e minerais semelhantes, já citados como: feldspatos, talcos, filitos.

Cada tipo de matéria prima utilizada nas formulações de porcelanato, assumem de acordo com sua mineralogia uma função específica, as matérias primas argilosas, por exemplo, proporcionam plasticidade a massa, enquanto as matérias primas ditas não plásticas, aquelas complementares, materiais fundentes e refratários, são responsáveis, respectivamente, pela densificação e da resistência mecânica do material (OLIVEIRA, 1998).

2.4.1 Argilas

De acordo com ABNT as argilas são matérias primas formadas por partículas coloidais e apresentam diâmetro menor que 0,005 mm. Outras características apresentadas por esse material são, alta plasticidade quando úmida, e torrões que não se desagregam facilmente com a força exercida pelos dedos.

Para a argila possuir aplicabilidade e demonstrar sua qualidade é necessário que a mesma apresente uma composição química adequada e que as quantidades de SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 , Na_2O , MgO , e CaO sejam determinadas. As impurezas muitas vezes encontradas nas argilas agregam características singulares as mesmas, por exemplo a coloração avermelhada remete a altos teores de ferro (SANTOS, 1975).

2.4.2 Caulim

O nome caulim remete a uma localidade na China, onde foram extraídas as amostras do material, o nome deriva da palavra chinesa Kauling que significa colina alta (BIFFI, 2002). A figura 5 ilustra o material em questão.



Figura 5: Caulim.
DEMBSKY (2018).

A palavra denomina tanto a rocha fonte de caulinita quanto o produto resultante do beneficiamento dessa rocha. É uma rocha de granulometria fina, composta de material argiloso, baixo teor de ferro, de cor branca. (GRIM, 1958). Segundo Gomes (1986) além da caulinita também podemos encontrar quartzo, feldspato, mica e minerais acessórios como a gibsita, montmorilonita, clorita, turmalina, fluorita, topázio, goethita, hematita, limonita e pirita. A caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um silicato de alumínio hidratado e apresenta a seguinte composição química 39,50% de Al_2O_3 , 46,54% de SiO_2 e 13,96% de H_2O .

Funciona como liga para as peças cerâmicas, além de contribuir dando plasticidade para modelar o corpo quando na presença de água (ALBURQUERQUE *et al.*, 2007).

2.4.3 Feldspatos

Segundo Santos (1975) os feldspatos (Figura 6) são conhecidos como materiais fundentes porque diminuem a temperatura de formação de fase líquida durante o processo de queima. Se diferenciam quimicamente em:

- Ortoclásio: feldspato potássico - KAlSi_3O_8 ;
- Albita: feldspato sódico - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$;
- Anortita: feldspato cálcico - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

Diminuindo os valores de absorção de água são encarregados de minimizar a porosidade nas peças. Como consequência aumentam os valores de resistência mecânica (PIANARO,2004).

A viscosidade é uma propriedade importante durante a fase líquida, tal propriedade pode ser controlada e /ou estabelecida de acordo com a proporção dos de óxidos formadores de vidro (SiO_2 e Al_2O_3) e dos óxidos modificadores de rede (Na_2O e K_2O) (PIANARO,2004). Encontramos a fase vítrea em baixas temperaturas e em corpos com maior percentual de sódio que potássio, o que traz a característica de fundente ao material. Essa característica é essencial para analisar as cerâmicas que são destinadas a confecção de produtos com valores baixos de absorção de água.



**Figura 6: Feldspato potássico.
DEMBSKY (2018).**

2.4.4 Filito

No Brasil é possível encontrar o filito em diversas formações geológicas como os Grupos Minas, São Roque e análogos. O filito é composto principalmente por Alumínio e Sílica, e é uma rocha fácil de pulverizar, fornecendo um pó finíssimo, e seus componentes essenciais são filossilicatos de pequeno tamanho de grão (VALERA et.al., 2002; ABREU, 1973).

O elevado teor de quartzo, juntamente com uma concentração de até 40% de filossilicatos (muscovita e caulinita), fazem do filito um material estratégico para a fabricação de cimento geopolimérico, um material que pode substituir o cimento Portland em aplicações estruturais.

Além de possuir planos de clivagem brilhoso e sedoso o filito apresenta xistosidade acentuada ou foliação. Possui característica de colorações variadas. Podem ser empregados em massas cerâmicas, indústrias de argamassa, plastificante, ração animal, pigmentos, aglutinantes, concretos especiais, e materiais à prova de água devido à baixa permeabilidade.

Os filitos são utilizados como substitutos parciais da fração argilosa e do feldspato da fração fundente das cerâmicas. Seu emprego em diversos teores aumenta a velocidade de sinterização de massas cerâmicas para louça de mesa, em ladrilhos de piso, em azulejos e em materiais refratários (suportam altas temperaturas sem deformar ou fundir). Devido à diversidade da natureza química e mineralógica, suas propriedades são tanto de materiais plásticos como de não-plásticos (MOTTA *et al*, 1998).

Outra vantagem que sua utilização apresenta para indústria é o fato de possuir baixo valor quando comparado às outras cargas minerais que substitui e também por ser uma rocha encontrada na crosta em abundância.

O filito ocorre geralmente com variação de colorações entre as cores branca, preta e rósea. Cada uma apresenta suas características químicas e aplicações diversas. Após a queima é comum apresentarem alta plasticidade, boa resistência mecânica e cores mais claras. O material de coloração branca é o produto que possui maior valor comercial. Apresenta cor mais clara após a queima à temperatura de 1000°C, e é comercializado como um substituto parcial das argilas brancas por ser um produto mais barato e por agir como fundente durante a queima dos cerâmicos. Os que apresentam a cor rósea em tonalidades claras tem encontrado espaço no mercado das argamassas e outros ramos, como na produção de ração animal e cargas minerais nas indústrias de tintas e selantes (SANTOS, 1992).

2.4.5 Talco

O silicato de magnésio hidratado, o talco, apresenta a seguinte composição $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$. São minerais moles, apresentam estrutura lamelar ou em camadas e apresentam untuosidade ao tato. As cerâmicas que contêm em sua composição talco, muitas vezes adquirem as seguintes características tecnológicas:

- Maior resistência ao choque térmico, para ciclos rápidos de queima;
- Maior resistência mecânica;
- Menor retração de queima;
- Menor temperatura de fusão das massas cerâmicas dependendo da quantidade.

2.4.6 Quartzo

O nome quartzo vem de uma palavra germânica. É uma fonte de inserção de sílica, o quartzo, representado na figura 7, também é considerado uma matéria prima indispensável a composição da massa cerâmica.



**Figura 7: Quartzo.
DEMBSKY (2018).**

Pode ser encontrado em abundância na crosta terrestre e as principais fontes para obtenção do quartzo são a partir dos arenitos e quartzitos, nas rochas está associado principalmente com o feldspato e a muscovita. Tem como fórmula química SiO_2 com composição química de 46,7 % de Si e 53,3% de O (DANA, 1976). Essa matéria prima atua no controle de dilatação e no ajuste da viscosidade da fase líquida formada durante a queima e facilita no processo de secagem e na liberação dos gases durante o processo de queima.

O quartzo, quartzito ou areia feldspática, são inertes e agem na minimização da retração da queima e regula a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, que é um parâmetro da formação da mulita (fase aluminossilicato, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). O quanto o quartzo reage em relação aos óxidos encontrados na massa depende do ciclo de queima utilizado e da sua granulometria (DANA, 1976).

Tal material era utilizado no passado devido à grande quantidade do mesmo encontrada e ao baixo custo. Entretanto sua influência hoje vai muito além disso, o uso de tal material influencia na resistência mecânica, retração, estabilidade dimensional a temperaturas elevadas e outras.

Assim, objetiva-se a utilização do quartzito alterado para ser um componente da massa cerâmica, substituindo assim o quartzo na mistura.

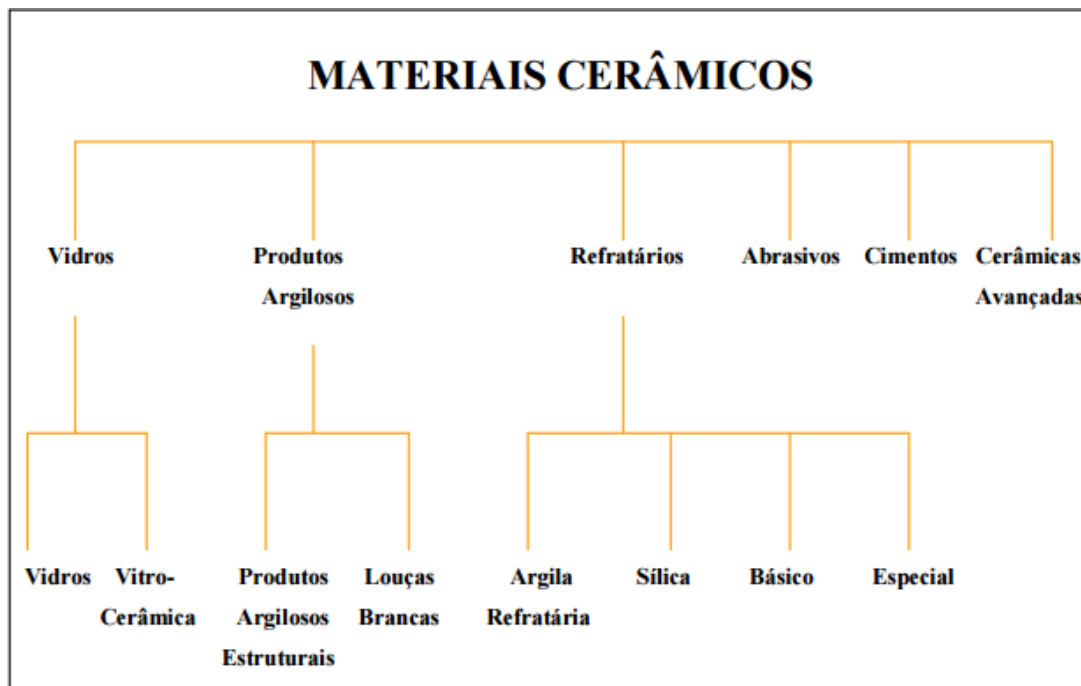
2.5 Processamento materiais cerâmicos

Para processar os materiais cerâmicos necessita-se de conhecimento prévio dos comportamentos e das características das matérias primas durante a fabricação. São inúmeras as variáveis a serem analisadas no decorrer do processo, pois são influencias diretas a qualidade da cerâmica, classificando assim como complexo o processamento.

Os produtos obtidos no processamento cerâmicos segundo (ALBUQUERQUE, 2009) possuem semelhanças totais ou parciais quando comparamos seu processo de formação. O que distingue é o tipo de peça que se almeja. Portanto as etapas podem ser citadas como:

- Preparação da matéria prima
- Preparação da massa
- Formação das peças
- Tratamento térmico
- Acabamento

Segundo Callister (2002) de acordo com a aplicação os produtos cerâmicos podem ser classificados de acordo com sua aplicação conforme ilustra o fluxograma da figura 8.



**Figura 8: Classificação dos materiais cerâmicos de acordo com sua aplicação.
CALLISTER (2002)**

2.5.1 Indústria de cerâmica nacional

No ano de 2005 o Brasil cresceu cerca de 7% seu PIB no setor de produção de cerâmica e aumentou as exportações em 25%, de acordo com a Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos – ANFACER.

Compõem hoje o setor de revestimento cerâmico no Brasil cerca de noventa e quatro empresas, disseminadas em 18 estados (ANFACER, 2010). A Tabela 1 apresenta os valores da produção nacional para os setores cerâmicos distintos no país.

Tabela 1– Valor da produção nacional dos diversos setores cerâmicos.

| Cerâmicos | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Segmento | Valor da Produção (1000 US\$/ano) |
| Cerâmica Estrutural (Vermelha) | 2.500.000 |
| Revestimentos (Pisos e Azulejos) | 1.700.000 |
| Matérias Primas Naturais | 750.000 |
| Refratários | 380.000 |
| Cerâmica Técnica, Especiais, outras | 300.000 |
| Sanitários | 200.000 |
| Louça de Mesa e Adorno | 146.000 |
| Fritas, Vidrados e Corantes | 140.000 |
| Matérias Primas Sintéticas | 70.000 |
| Cerâmica Elétrica | 60.000 |
| Equipamentos para Cerâmica | 25.000 |
| Abrasivos | 20.000 |
| TOTAL DO SETOR | 6.293.000 |

ANFACER (2010).

2.5.2 Considerações sobre cerâmicas para revestimentos

Podem ser atribuídas as seguintes características aos materiais de revestimentos:

- Máxima estabilidade dimensional durante queima, com valores de retração praticamente nulos (inferiores a 1%);
- Porosidade compreendida entre 3 e 18% (expressa como absorção de água);
- Valores de módulo de ruptura do produto queimado entre 200 e 250 Kgf/cm².

As características técnicas de revestimento relativas às propriedades dimensionais, físicas e químicas podem ser analisadas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Características segundo a norma EN 159 e valores dos produtos encontrados no mercado.

| Característica | Norma | Valores Prescritos | Valores reais - produtos |
|--|--------|---------------------------------------|---|
| Absorção de água | EN 99 | > 10% | 13-18% |
| Resistência à flexão | EN 100 | ≥ 12 N/mm ² | > 20 N/mm ² |
| Resistência à abrasão | EN 154 | Especificada pelo fabricante | Especificada pelo fabricante |
| Resistência ao gretamento | EN 105 | Requerida | Requerida |
| Expansão térmica linear | EN103 | $\leq 9 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ | 7 - 7,5x10 ⁻⁶ °C ⁻¹ |
| Resistência a produtos químicos domésticos | EN 122 | Classe B (mínimo) | AA/A |
| Choque térmico | EN 104 | Requerida | Requerida |
| Dureza de Mohs | EN 101 | > 3 (revestimentos) | 4 |
| | | > 5 (pavimentos) | 5 |
| Resistência a ácidos e bases | EN 122 | Não requerida | Não requerida |
| Resistência à manchas | EN 122 | Classe 2 (mínimo) | 2 |

*Caso se trate de pavimentos

BARBA et al.(2002)

A Tabela 3 mostra a composição química das matérias primas utilizadas na fabricação de revestimento cerâmico. As massas cerâmicas nacionais possuem em sua formulação principalmente caulinita, ilita, calcita, dolomita, feldspato sódico ou potássico, talco e quartzo. A proporção entre os minerais presentes nas massas é a principal responsável pelas fases cerâmicas formadas na queima do revestimento, além das condições de queima e do tamanho das partículas no produto. Conseqüentemente, junto às condições de processamento, a composição mineralógica influencia diretamente a propriedade do produto acabado (BARBA et al., 2002).

Tabela 3- Composição química de matérias-primas empregadas na fabricação de revestimentos.

| Matérias-primas | Composição Química (%) | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | P.F. ¹ |
| A-argilas carbonáticas | 55 | 12 | 1 | 0,5 | 0,1 | 1 | 8 | 1 | 12 |
| B-argilas gresificáveis | 60 | 15 | 2 | 1 | 0,1 | 3 | 1 | 0,5 | 6 |
| C-argilas plásticas ² | 55 | 22 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 6 |
| D-argilas caulínicas | 50 | 25 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 7 |
| E-areias feldspáticas | 80 | 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 2 |
| F-quartzo | 92 | 2 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| G-calcita | 2 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 46 | 2 | 40 |

¹Perda ao Fogo ²Argilas plásticas

BARBA et al.(2002)

O quadro 1 (OLIVEIRA, 1998) apresenta diversas composições químicas de massas para revestimento poroso. Observa-se que as massas cerâmicas 2 e 4 são massas de queima vermelha devido ao teor de ferro (expresso como Fe_2O_3) variar de 4,60 até 4,90 %. As massas cerâmicas 1 e 3 apresentam teores de ferro entre 0,53 e 1,90 % e, portanto, são massas de queima branca ou clara. Uma característica comum a todas as massas cerâmicas é o teor de cálcio (expresso como CaO) que varia de 5,80 até 9,40 %. Isto indica a presença de um elevado teor de carbonato de cálcio na composição das massas cerâmicas.

Quadro 1- Composições químicas de massas para revestimento (Oliveira, 1998).

| Óxidos Constituintes | Massa cerâmica | | | |
|--------------------------------|----------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| SiO ₂ | 65,4 | 54,8 | 60,3 | 59,4 |
| Al ₂ O ₃ | 12,9 | 16 | 13,4 | 11,6 |
| K ₂ O | 0,72 | 2,4 | 1,2 | 2,5 |
| Na ₂ O | 0,19 | 1 | 0,25 | 2 |
| TiO ₂ | 7 | 8,1 | 9,4 | 5,8 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,53 | 4,9 | 1,9 | 4,6 |
| CaO | 0,29 | 0,9 | 0,57 | 0,63 |
| MgO | 1,3 | 0,8 | 0,31 | 3,1 |
| P.F. | 11,7 | 11,3 | 12,8 | 10,4 |

P.F. = perda ao fogo

Estudos com a finalidade de utilizar o quartzito como fonte de quartzo para massas cerâmicas de revestimentos já foram realizados por inúmeras literaturas. Tais análises mostraram que, por exemplo o resultado da análise química, expresso na Tabela 4, demonstra um bom critério para o uso do quartzito na massa cerâmica, objetivando a troca do quartzo uma vez que ele apresentou um maior teor de sílica (SiO₂).

Tabela 4- Resultado da análise química por FRX das matérias primas

| Óxidos | Argila | Feldspato | Quartzo | Quartzito |
|--------------------------------|--------|-----------|---------|-----------|
| SiO ₂ | 64,072 | 70,976 | 97,092 | 92,567 |
| K ₂ O | 4,884 | 14,154 | 0,316 | 2,208 |
| Al ₂ O ₃ | 23,925 | 12,632 | 2,052 | 3,207 |
| CaO | 0,156 | 0,956 | 0,058 | 0,124 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,081 | 0,41 | - | 1,08 |
| SO ₃ | 0,388 | 0,353 | 0,482 | 0,467 |
| P ₂ O ₅ | - | 0,262 | - | - |
| TiO ₂ | 2,681 | - | - | 0,165 |
| Rb ₂ O | 0,035 | 0,133 | - | 0,009 |
| Sm ₂ O ₃ | - | - | - | 0,173 |
| MnO | - | 0,075 | - | - |
| MgO | 0,481 | - | - | - |
| SrO | 0,097 | 0,022 | - | - |
| CuO | 0,047 | 0,012 | - | - |
| NbO | - | 0,008 | - | - |
| Y ₂ O ₃ | 0,017 | 0,007 | - | - |
| ZnO | 0,019 | - | - | - |
| Ir ₂ O ₃ | 0,045 | - | - | - |
| ZrO ₂ | 0,072 | - | - | - |

M. E. A. Carreiro et al. (2016).

Portanto o quartzito possui uma composição química favorável a incorporação a massa cerâmica (M. E. A. CARREIRO *et al*, 2016) Por apresentar um teor de sílica elevado e baixos teores de ferro e titânio. Os outros integrantes que também irão compor a massa possuem os óxidos já retratados pela literatura, quartzo com sílica (SiO₂) elevada e alguns contaminantes. O feldspato com teores elevados de sílica (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de potássio (K₂O) e a argila com teores de sílica (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de potássio (K₂O) elevados. Outra análise química com a mesma finalidade pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5- Composição química das matérias primas.

| Composição | Na ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | MnO | Fe ₂ O ₃ | P.F. |
|----------------------|-----------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------|------------------|------|--------------------------------|------|
| Resíduo de Quartzito | 0 | 0,63 | 9,99 | 83,13 | 0 | 3,33 | 0,54 | 0,13 | 0 | 0,94 | 1,3 |
| Massa Cerâmica | 1,57 | 2,06 | 24,2 | 54,98 | 0,2 | 2,54 | 1,3 | 0,56 | 0,14 | 5,02 | 7,5 |

J. M. S. MOREIRA; J. P. V. T. MANHÃES; J. N. F. HOLANDA (2005)

A análise revela que a SiO₂ é o componente que apresenta as maiores quantidades, com alguns traços de Al₂O₃ e K₂O. Já os dados da massa cerâmica revelam maiores quantidades de sílica (54,98%) e de alumina (24,2%), com presença relevante de MgO, K₂O e Na₂O.

Alguns pesquisadores também estudaram tal incorporação em massas cerâmicas e encontraram, na análise química, teores de sílica similares aos encontrados neste trabalho.

As Figuras 9 e 10 ilustram respectivamente o difratograma de raios X da massa cerâmica e o do quartzito. O difratograma da massa cerâmica apresenta as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, feldspato, quartzo e calcita. No quartzito observam-se as seguintes fases mineralógicas: quartzo, feldspato e mica.

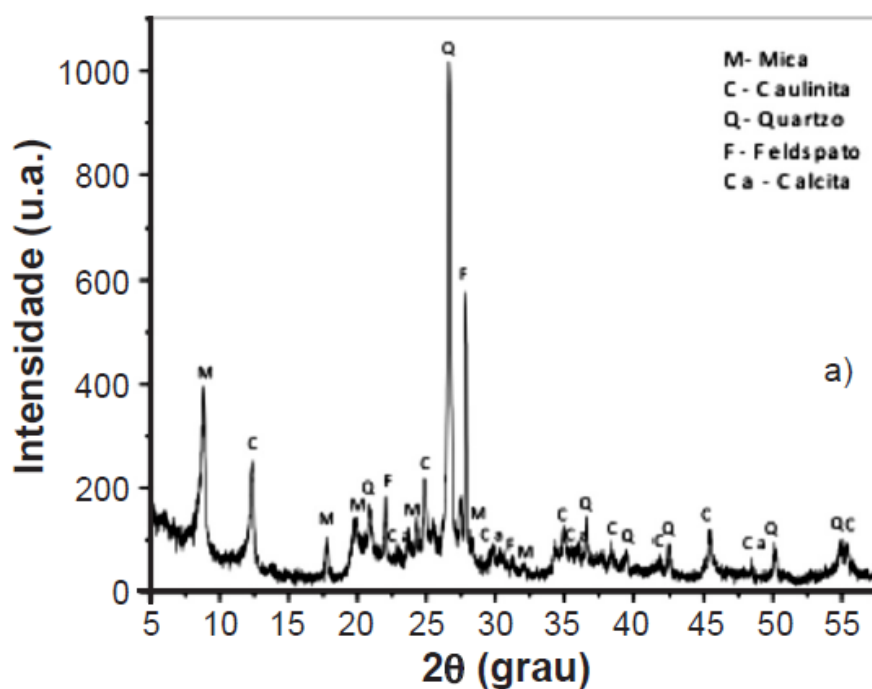


Figura 9: Difratograma de raio X da massa cerâmica.
M. E. A. Carreiro et al.(2016).

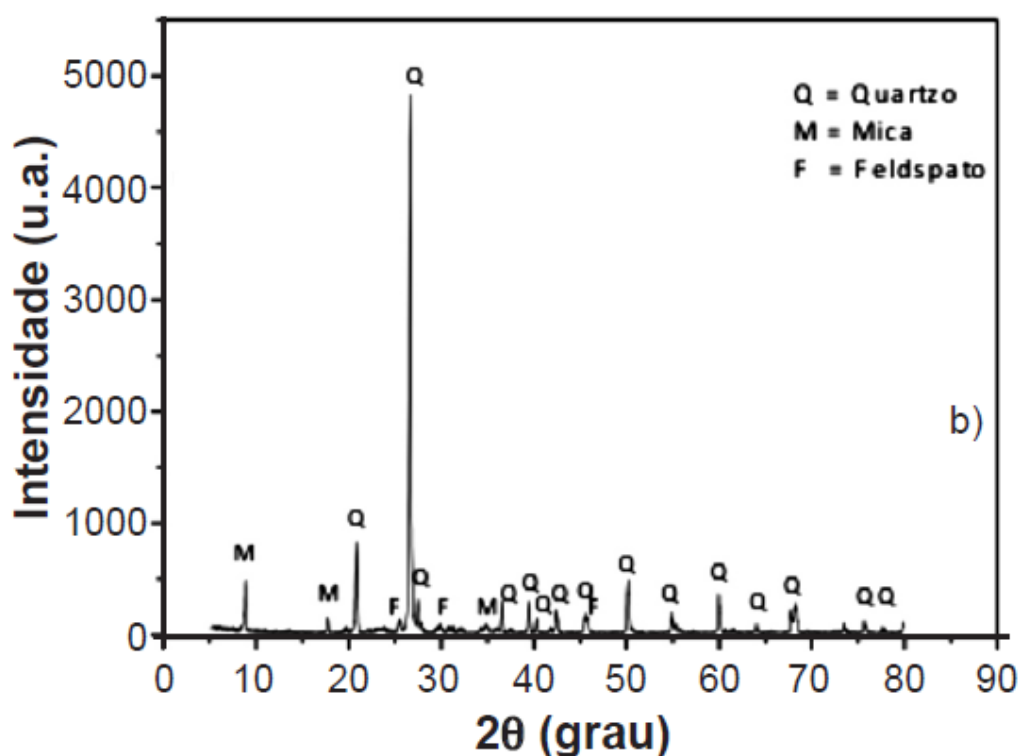


Figura 10: Difratoograma de raio X do quartzito.
M. E. A. Carreiro et al.(2016).

Todos os minerais detectados no quartzito estão geralmente presentes nas matérias-primas utilizadas para a produção das cerâmicas tradicionais, tornando possível a sua incorporação. Outra análise de DRX (Figura 11) com a mesma finalidade mostra resultados semelhantes.

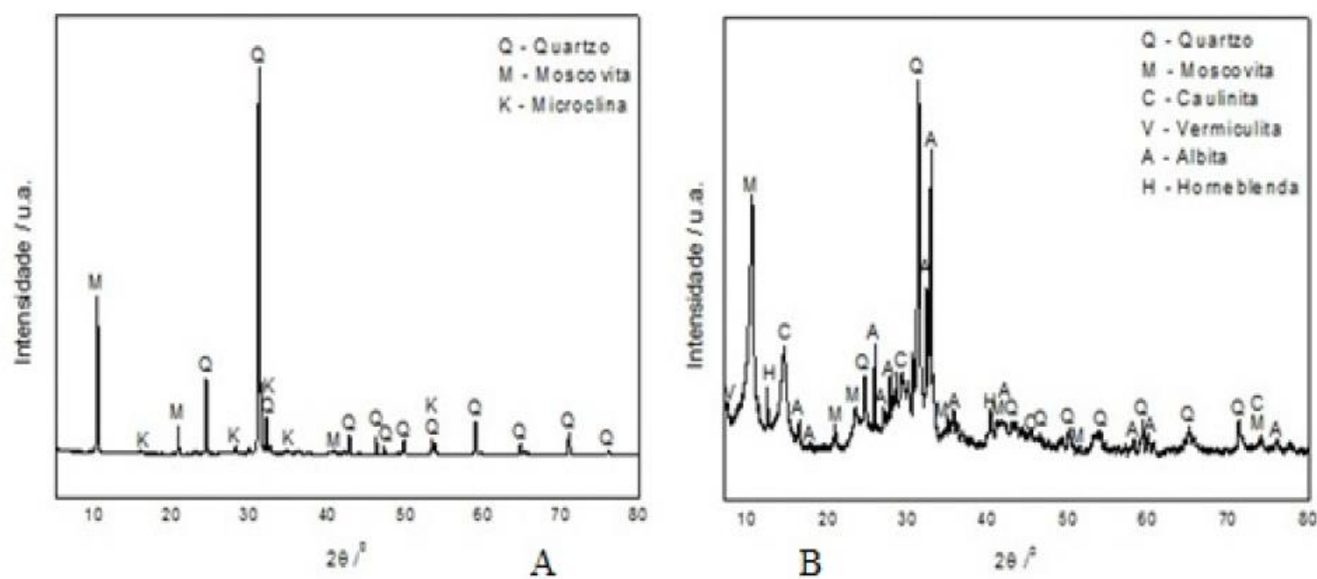


Figura 11: Difratoograma do quartzito (A) e da massa cerâmica (B) respectivamente.
J. M. S. MOREIRA; J. P. V. T. MANHÃES; J. N. F. HOLANDA (2005).

No difratograma do quartzito, mostrado na Figura 11A, observa-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo (SiO_2) que é um mineral responsável pelo desenvolvimento de plasticidade e apresenta comportamento de queima refratário, a mica moscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$), pode atuar como material fundente devido a presença de óxidos alcalinos, e a microclina (KAlSi_3O_8) que é um feldspato alcalino. Na análise mineralógica da massa cerâmica (Figura 11B) são observados os picos do quartzo, da mica moscovita, da caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), da vermiculita ($(\text{MgFe}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), e de silicatos como a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e a hornblenda ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$).

As matérias primas utilizadas na indústria cerâmica assim como o processo de produção de cerâmicas foram abordados no presente trabalho, devido a possibilidade de incorporação do quartzito alterado nesse cenário de produção. Portanto as matérias primas foram retratadas a título de conhecimento das mesmas e a título de comparação, para avaliação de possível substituição de alguma delas pelo quartzito. O processo cerâmico por sua vez foi citado, uma vez que a conformação de revestimentos cerâmicos está diretamente ligado a produção geral de cerâmicas.

3 METODOLOGIA

3.1 Coleta e preparação de amostras

O Quartzito foi coletado nas margens da rodovia BR 262, no Km (729) próximo à região do distrito de Alpercatas, como pode ser visualizado na figura 12.



Figura 12: Ponto de coleta do Quartzito.

A preparação da amostra foi realizada no laboratório do CEFET/MG – Campus IV, na cidade de Araxá, para os ensaios de caracterização de acordo com a NBR 6457, Amostras de Solo – preparação para ensaios de compactação e caracterização (ABNT, 1986) o material foi separado para os ensaios de análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, teor de umidade e massa específica. Em seguida, foi feita uma caracterização, através dos ensaios de perda ao fogo, fluorescência de raio-X, difração de raio-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2 Caracterização Física

A caracterização física do material foi realizada no CEFET/MG – Campus IV, na cidade de Araxá.

3.2.1 Análise tátil visual

Com ajuda Lupa binocular (Figura 13), a amostra foi analisada e foi possível observar melhor os detalhes dos grãos do material porque a olho nu a diferenciação entre as fases presentes é pouco clara.



Figura 13: Lupa Binocular.

3.2.2 Análise granulométrica

Para determinação da granulometria das partículas do quartzito utilizamos um equipamento chamado granulômetro a laser, da marca CILAS, modelo 1090. A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/BH. Um programa de computador realiza a contagem das partículas. Consiste em fazer passar um laser pela amostra das partículas e recolher os dados da intensidade de luz em

diferentes ângulos de distribuição. A distribuição do tamanho das partículas é obtida através da comparação das diferentes intensidades de luz nos diferentes ângulos (SANTOS, 1989). A faixa de leitura do equipamento varia de 0,04 a 500 μm , podendo assim ler partículas de tamanhos muito reduzidos. Os resultados dessa análise são expressos em um gráfico de porcentagem acumulada de partículas (%) versus diâmetro das partículas (μm) e em tabelas dos diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} .

3.2.3 Limite de Plasticidade

Para a execução do ensaio de plasticidade a amostra foi previamente preparada de acordo com a NBR 6457. Visando uma amostra homogênea e de consistência plástica, o material foi colocado em uma capsula de porcelana onde com incrementos de água destilada foi misturado por um tempo de 15 a 30 minutos com o auxílio de uma espátula. Cerca de 10g da massa foi retirada da capsula de porcelana e preparada até tomar a forma de uma bola, após foi rolada sobre uma placa de vidro até tomar forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro e comprimento de 10 cm (Fig. 14). As partes do cilindro formado devem ser transferidas a um recipiente adequado para a determinação de umidade. Se a amostra se fragmentar antes de atingir os 3 mm, retornar a mesma a capsula de porcelana e repetir o procedimento descrito na NBR 7180.

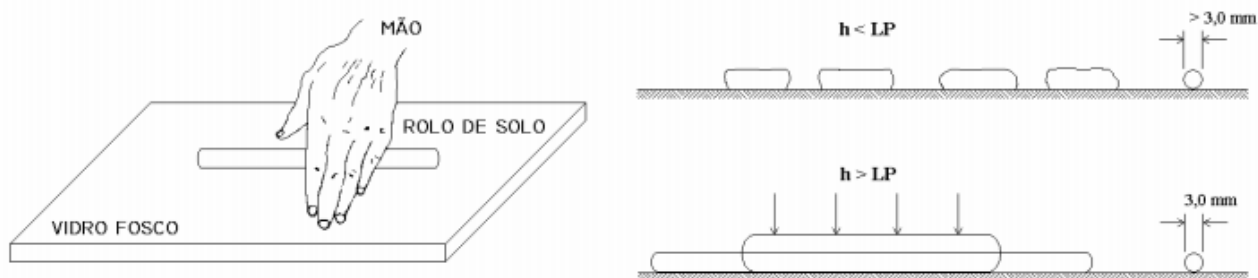


Figura 14: Ilustração do ensaio do limite de plasticidade.
<https://www.teconcurtos.com.br/conteudo/questoes/94521>.

3.2.4 Limite de Liquidez

A amostra foi preparada para realização do ensaio conforme a NBR 6457. A amostra foi colocada em uma capsula de porcelana e juntamente a ela foi adicionada aos poucos, água destilada. Com auxílio de uma espátula a massa foi misturada vigorosamente por um intervalo

de tempo compreendido de 15 a 30 min até que uma massa homogênea fosse obtida (Figura 15).



Figura 15: Amostra na capsula de porcelana e água destilada para realização do ensaio de Liquidez.

Parte da mistura homogênea foi transferida para a concha do aparelho de Casagrande e foi moldada até que a parte central a espessura da massa atingisse 10mm. Com auxílio do cinzel a massa foi dividida em duas partes de acordo com a NBR 6469 (ABNT 1984) (Figura 16). A concha do equipamento foi golpeada contra a base no decorrer dos giros da manivela até que as bordas inferiores da massa se unissem (Figura 17). Uma pequena quantidade do material foi transferida para um recipiente para determinação de umidade conforme a NBR 6457. O restante da massa foi transferida para a capsula de porcelana, a concha do aparelho e o cinzel foram limpos e os procedimentos descritos a cima foram repetidos por mais duas vezes.

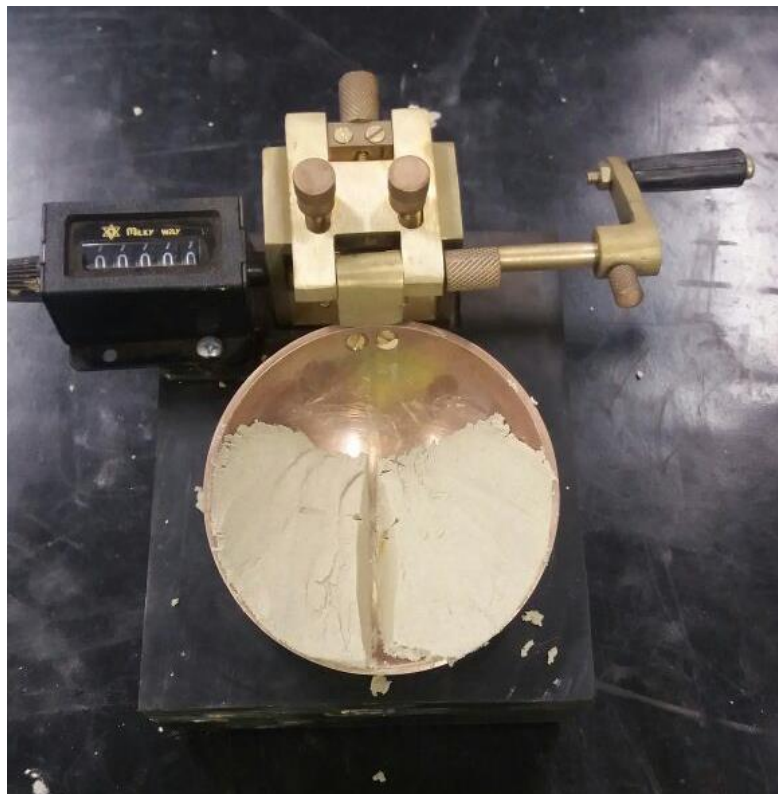


Figura 16: Ensaio Limite de Liquidez no aparelho Casagrande.



Figura 17: Ensaio Limite de Liquidez no aparelho Casagrande, após os golpes.

3.3 Caracterização química

As análises da caracterização química foram realizadas no CEFET-MG – Campus Araxá e Campus Belo Horizonte. Os testes de caracterização química realizados foram:

- I. Perda ao fogo;
- II. Espectrometria de Fluorescência de Raios X;
- III. Difração de Raios X;
- IV. Microscopia Eletrônica de varredura – MEV.

3.3.1 Perda ao Fogo

De acordo com a NBR NM 18 (ABNT 2004) o ensaio de perda ao fogo é responsável por avaliar o percentual de matéria orgânica que foi perdido pela amostra durante o processo de queima. O teste foi realizado em triplicata para obtenção de resultados mais representativos.

Em um cadinho de porcelana de massa previamente determinada foi colocado $1 \pm 0,001$ g de amostra. Posteriormente o material foi levado a mufla (Figura 18) à temperatura de 900°C a 1000°C durante 50 minutos, após esse tempo a amostra foi levada a um dessecador para esfriar a temperatura ambiente.



Figura 18: Amostra colocada na mufla.

A perda ao fogo foi calculada pela equação.

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100$$

Onde:

PF – perda ao fogo, em porcentagem;

m1 – tara do cadinho + massa de amostra ensaiada, em gramas;

m2 – massa do cadinho + amostra, após a calcinação, em gramas;

m – massa de amostra utilizada no ensaio, em gramas.

3.3.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X

A partir dessa técnica é possível identificar os elementos de um material como estabelecer a proporção que esses elementos apresentam em relação ao todo. O funcionamento do aparelho é baseado em uma fonte de radiação com alta energia (radiação x) que provoca excitação dos átomos constituintes da amostra. Quando um átomo no estado fundamental é exposto a ação de uma fonte externa, ele absorve a energia, levando os elétrons da amostra a níveis mais energéticos, ficando em estado excitado. Na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade, então o elétron retorna ao seu estado fundamental, onde é possível captar uma emissão de energia. Então essa energia que estava envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento, podendo assim ser analisada e assim conseguimos identificar os elementos e suas quantidades (BECKHOFF, 2006). Por meio dos comprimentos de onda um cristal difrator seleciona os raios x, correspondendo à *lei de Bragg* da difração. O comprimento de onda que foi difratado poderá ser calculado pela equação da *Lei de Bragg*.

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

Onde,

n = é um número inteiro;

λ = comprimento de onda da radiação;

d = distância interplanar;

θ = complemento do ângulo de incidência.

3.3.3 Difração de Raios X

A difração de raio-X é um dos principais métodos de caracterização microestrutural de materiais cristalinos. O equipamento emite um raio laser sobre material, onde para cada espécie contida no material é devolvido um raio a um determinado ângulo. Cada um desses ângulos representa um mineral na amostra, uma vez que amostras geralmente apresentam diferentes composições. O resultado é representado em um gráfico de picos, estes picos caracterizam os principais elementos presentes na amostra. A técnica de difração de raios X tem sido amplamente utilizada para a determinação de fases cristalinas em materiais cerâmicos. A análise difratométrica realizada no material em estudo foi feita no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/BH.

3.3.4 Microscopia Eletrônica de varredura – MEV

A microscopia de varredura de feixes de elétrons não fornece apenas a imagem da amostra. Este ensaio também é capaz de fazer uma micro-análise e identificar a constituição química da amostra, através dos óxidos mais prováveis de serem formados. Sobre a superfície da amostra é emitido um feixe de elétrons, esses elétrons varrem tal superfície, alguns desses feixes são refletidos e se forem captados por um detector, o mesmo converte o sinal em imagem. Existem dois tipos de detectores, os de elétrons secundários e o de elétrons retro espalhados. O microscópio eletrônico de varredura traz como resultado imagens de alta ampliação e resolução (ALVES, 2008). Na presente metodologia foi utilizado o detector de elétrons retro espalhados, este detector fornece uma imagem de média resolução, porém com bom contraste. O contraste depende da massa específica dos elementos, da topografia e da composição química da amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Coleta das amostras

Após a coleta do material de pesquisa, o mesmo foi seco a temperatura ambiente e homogeneizado em laboratório. A figura 19 mostra o detalhe da coleta da amostra.



Figura 19: Detalhe do local de extração a amostra.

Após o processo de secagem, o material foi quarteadado com auxílio de um Quarteador tipo Jones para se obter uma amostra em quantidade suficiente para os ensaios que garantisse uma unidade representativa do todo.

A preparação de amostras foi realizada no laboratório para os ensaios de caracterização de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986) o material foi separado para os ensaios de análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, perda ao fogo, difração de raios-X, fluorescência de raio-X e MEV.

4.2 Caracterização mineralógica

A figura 19 é uma imagem do Google Earth e indica a região dentro do Grupo Canastra de onde foi coletado o quartzito que foi caracterizado no presente trabalho.



Figura 20: Imagem da região de onde foi coletado o Quartzito.

<https://earth.google.com/web/@-19.62258784,-47.27362463,1116.07773462a,739.61207559d,35y,-0h,0t,0r>.

Podemos observar a seguir o mapa geológico, Folha de Sacramento, (CODEMIG, 2017) (Figuras 20 e 21) que contém a região que abrange o Grupo Canastra, região a qual se destaca pela cor amarela. A região de coleta do material foi destacada com um círculo vermelho.

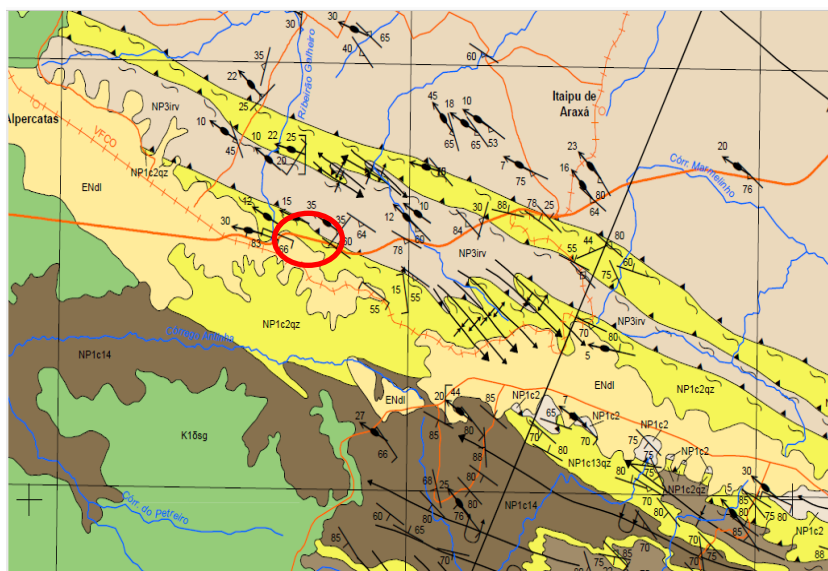


Figura 21: Mapa Geológico da região de onde foi coletado o Quartzito, Grupo Canastra. CODEMIG (2017), escala 1:100000.

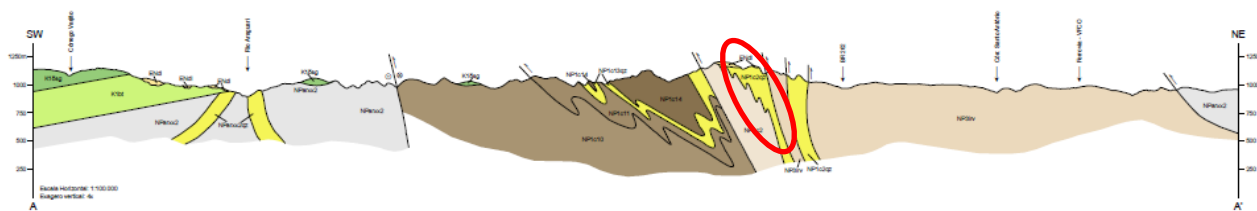


Figura 22: Perfil Geológico da região de onde foi coletado o Quartzito, Grupo Canastra. CODEMIG (2017), escala 1:100000.

O quartzito é uma rocha metamorfica formada a partir de arenito. O material estudado no presente trabalho é um quartzito friável, alterado, e por isso não pode ser utilizado como rocha ornamental. A rocha sofreu forte influência dos processos intempéricos o que o torna friável. Contudo essa rocha não está totalmente solta, liberada. Quando a rocha possui essa característica de ser friável, ela é explotada muito facilmente.

Essa rocha se formou em condições de alta pressão e temperatura, e agora ela está em um ambiente diferente do seu ambiente de formação, esse novo ambiente a desestabilizou. Ao longo do tempo sofreu sucessivos processos de intemperismo e erosão. Esses processos ocorrem de fora pra dentro, da superfície da rocha pra seu interior. Por isso muitas vezes no seu interior a rocha está preservada.

A amostra é formada em sua maioria por partículas que possuem escala milimétrica, tal aspecto é um indicativo de sua característica friável e de ações de forças intempéricas que atuaram sobre a rocha original, alterando-a até chegar às características atuais. Podemos observar a imagem do material na figura 23.

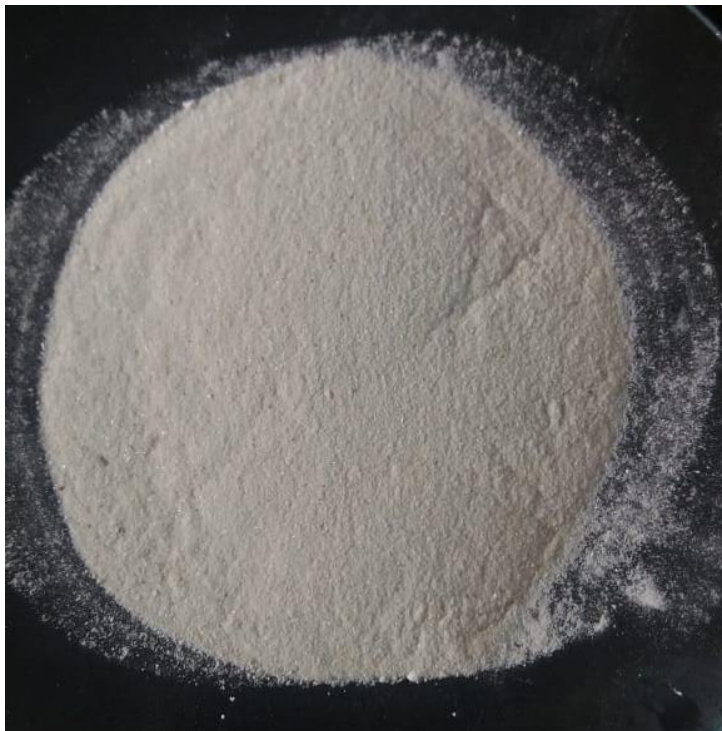


Figura 23 :Amostra do quartzito alterado.

4.3 Análise Tátil Visual

A amostra apresenta uma coloração clara, não apresentando partículas visíveis, possui granulometria homogênea e fina. A amostra é um pouco sedosa ao tato e identifica-se nitidamente as placas de muscovita que apresentam maior brilho em meio aos cristais de quartzo, como podemos observar na figura 24, a imagem foi tirada com um aumento de 20 vezes na lupa.

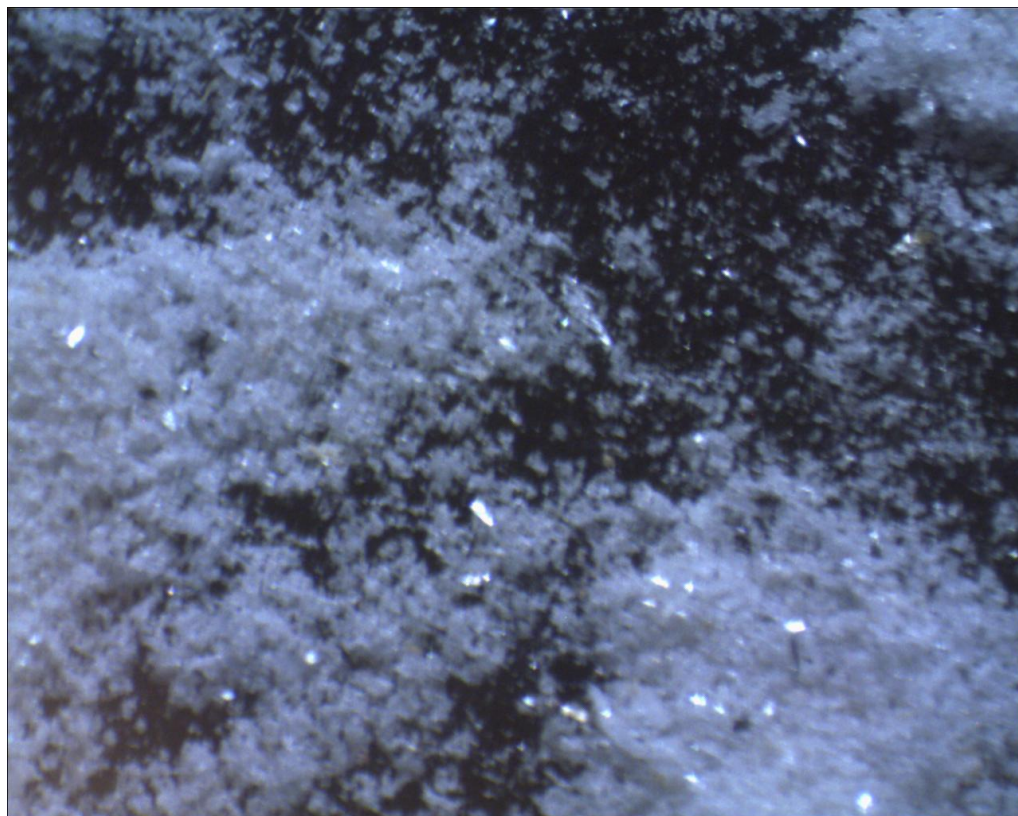


Figura 24: Amostra vista através da lupa binocular, com aumento de 20X.

4.4 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria a laser apresentou como resultados os diâmetros D10, D50 e D90, representando respectivamente 10%, 50% e 90% do total da massa do material analisado, valores indicados na Tabela 6.

Tabela 6– Diâmetros D10, D50 E D90 da amostra de quartzito.

| Amostra | D10 μm | D50 μm | D90 μm |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Quartzito | 15,26 | 65,7 | 426,78 |

O ensaio mostrou que o material possui granulometria fina, sendo que 90% da massa total da amostra possui grãos com diâmetros inferiores a 426,78 μm e 50% da amostra possui grãos com diâmetros inferiores a 65,7 μm . Estas dimensões de partículas conferem ao quartzito condições de atuar como adições minerais. Contudo a massa em sua maior parte apresenta granulometria retida na peneira de 45 μm e os materiais que compõem as massas cerâmicas necessitam apresentar material retido na peneira 45 μm menor que 20%. A curva de distribuição granulométrica do quartzito pode ser observada na Figura 25.

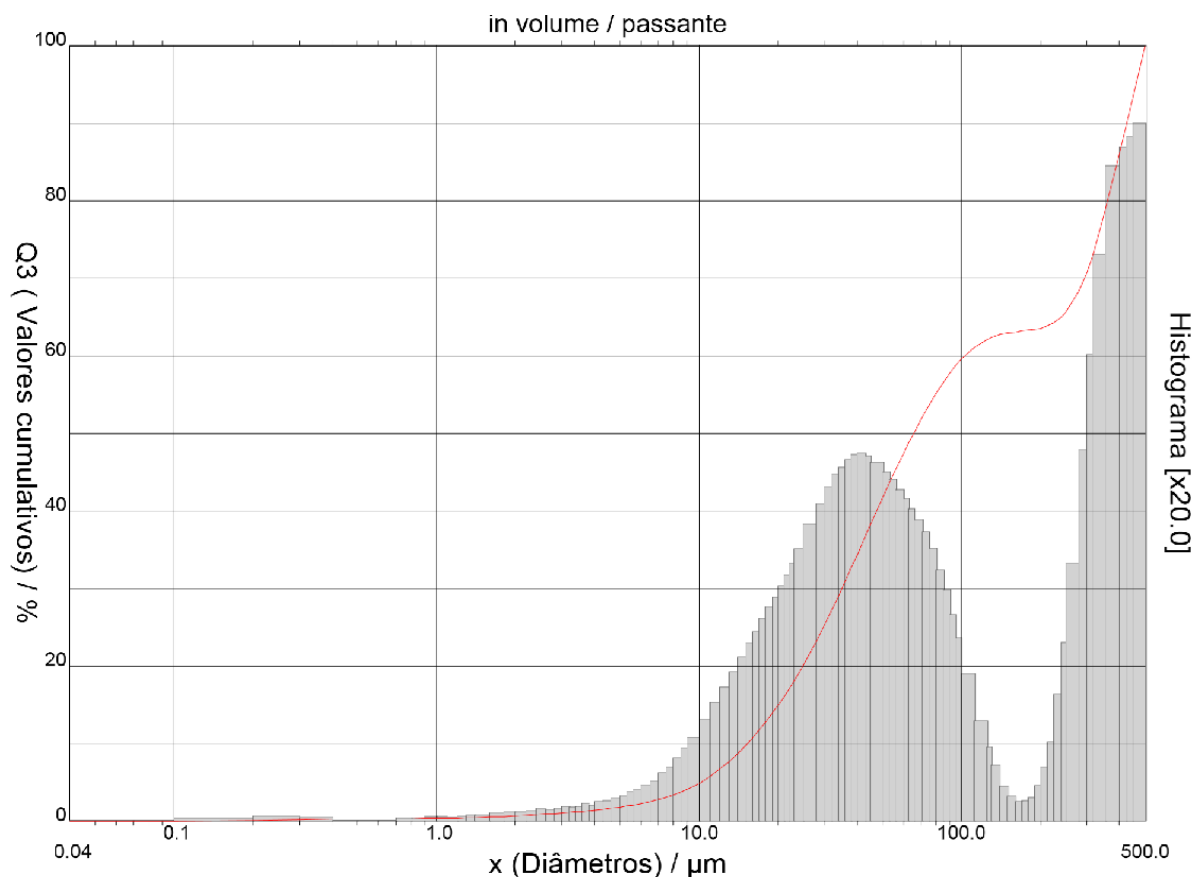


Figura 25: Curva Granulométrica do Quartzito.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

4.5 Limite de Plasticidade

De acordo com ensaio realizado foi possível concluir que a amostra de quartzito não apresenta limite de plasticidade (NP), por que não foi possível formar um cilindro de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, como é estabelecido na norma (Figura 26). A amostra não permanecia coesa quando foi rolada sobre a placa de vidro. Isso ocorre por que para que a plasticidade possa manifestar-se em um solo é necessário que a forma de suas partículas finas permita que elas deslizem, umas por sobre outras, desde que haja quantidade suficiente de água para atuar como lubrificante. Contudo houve fissuração por que quartzo e o feldspato componentes de solos arenosos, não desenvolvem misturas plásticas. Possuem consistência friável quando úmido.



Figura 26: Cilindro para o ensaio de limite de plasticidade.

4.6 Limite de Liquidez

Os valores obtidos e demonstrados na tabela 7, são considerados satisfatórios por que nenhum se distância da média mais do que 5%. Contudo durante o ensaio de liquidez não foi possível conseguir que a ranhura fechasse com mais de 25 golpes, o número de golpes foi inferior ao estipulado, então consideramos que a amostra de quartzito não apresenta limite de liquidez (NL). Isso ocorre porque o solo com elevado teor de sílica possui baixa coesão e baixa retenção de água apresentando assim consistência friável quando úmido.

Tabela 7: Resultado do teste de Limite de liquidez

| Amostra | Cápsula + tampa | Cápsula + tampa + material úmido | Cápsula + tampa + material seco | Úmidade(%) | Número de golpes |
|---------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 20,49 | 30,05 | 27,71 | 32,4% | 11 |
| 2 | 27,10 | 37,27 | 34,83 | 31,6% | 15 |
| 3 | 15,99 | 24,55 | 22,33 | 35,0% | 17 |
| | | | | Média das Úmidades | 33,0% |

4.7 Caracterização química

A seguir são apresentados os resultados dos métodos de caracterização química utilizados nesta pesquisa.

4.7.1 Perda ao Fogo

Após os ensaios, calculou-se a perda ao fogo percentual, podemos ver os resultados obtidos na tabela 8.

Tabela 8 – Ensaio de Perda ao Fogo

| Teste | Cadinho vazio (g) | Amostra (g) | Cadinho + Amostra (g) | Cadinho + Amostra após a queima (g) | % de Perda ao Fogo |
|-------|-------------------|-------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------|
| 1 | 40,81 | 1,0 | 41,81 | 41,81 | 0% |
| 2 | 40,81 | 1,0 | 41,81 | 41,81 | 0% |
| 3 | 40,81 | 1,0 | 41,81 | 41,81 | 0% |

A amostra de quartzito não apresentou perda ao fogo. Devido à baixa quantidade de matéria orgânica presente na amostra. A massa que se perde no processo de PF resulta também da quantidade de argilominerais e hidróxidos de Ferro e Alumínio presentes no solo, sendo esses produtos do intemperismo, as proporções desses componentes no quartzito são muito baixas, o que pode ser observado na tabela 10, tornando assim o resultado obtido pertinente. A Tabela 3 e a 5 também demonstram que os materiais com elevados teores de sílica utilizados como componentes das massas cerâmicas apresentem valores de perda ao fogo próximos de 1%.

4.7.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X

A análise de espectrometria de fluorescência de raios X trouxe como resultado químico os valores estão representados na tabela 9 e 10.

Tabela 9 - Elementos presentes na composição do Quartzito alterado.

| Elemento | Porcentagem (%) |
|----------|-----------------|
| Si | 80.661 |
| Al | 8.079 |
| K | 6.052 |
| Fe | 3.516 |
| Ba | 0.549 |
| Ti | 0.517 |
| S | 0.424 |
| Zr | 0.152 |
| Sr | 0.031 |
| Rb | 0,019 |

A Tabela 9 apresenta a análise química elementar da amostra. Observa-se que o elemento com maior porcentagem é o silício (80,661%), seguido pelo alumínio (8,079%), potássio (6.052%) e ferro (3,516).

Tabela 10 – Composição química dos óxidos obtida pela espectrometria de fluorescência de raio-x.

| Composição | Porcentagem (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| SiO ₂ | 85.530 |
| Al ₂ O ₃ | 9.525 |
| K ₂ O | 2.477 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.547 |
| SO ₃ | 0.371 |
| TiO ₃ | 0.277 |
| BaO | 0.197 |
| ZrO ₂ | 0.059 |
| SrO | 0.010 |
| Rb ₂ O | 0.006 |

Analisando a Tabela 10 acima, nota-se uma elevada porcentagem dos óxidos SiO₂ (85.530%) e Al₂O₃ (9,525%). O que demonstra segundo a tabela 3, 4 e 5 e pelo quadro 1 que o material pode ser aplicado como matéria prima da indústria cerâmica de refratários por apresentar valores elevados de SiO₂ e Al₂O₃ assim como aos apresentados na bibliografia.

4.7.3 Difração de Raios X

O resultado da análise de difração de raios X demonstrou a composição mineralógica do quartzito alterado. Podemos observar, na figura 27, os picos maiores de quartzo e os menores de muscovita, mostrando assim o caráter cristalino do material. O resultado da análise de DRX comprova os resultados obtidos pela análise de FRX.

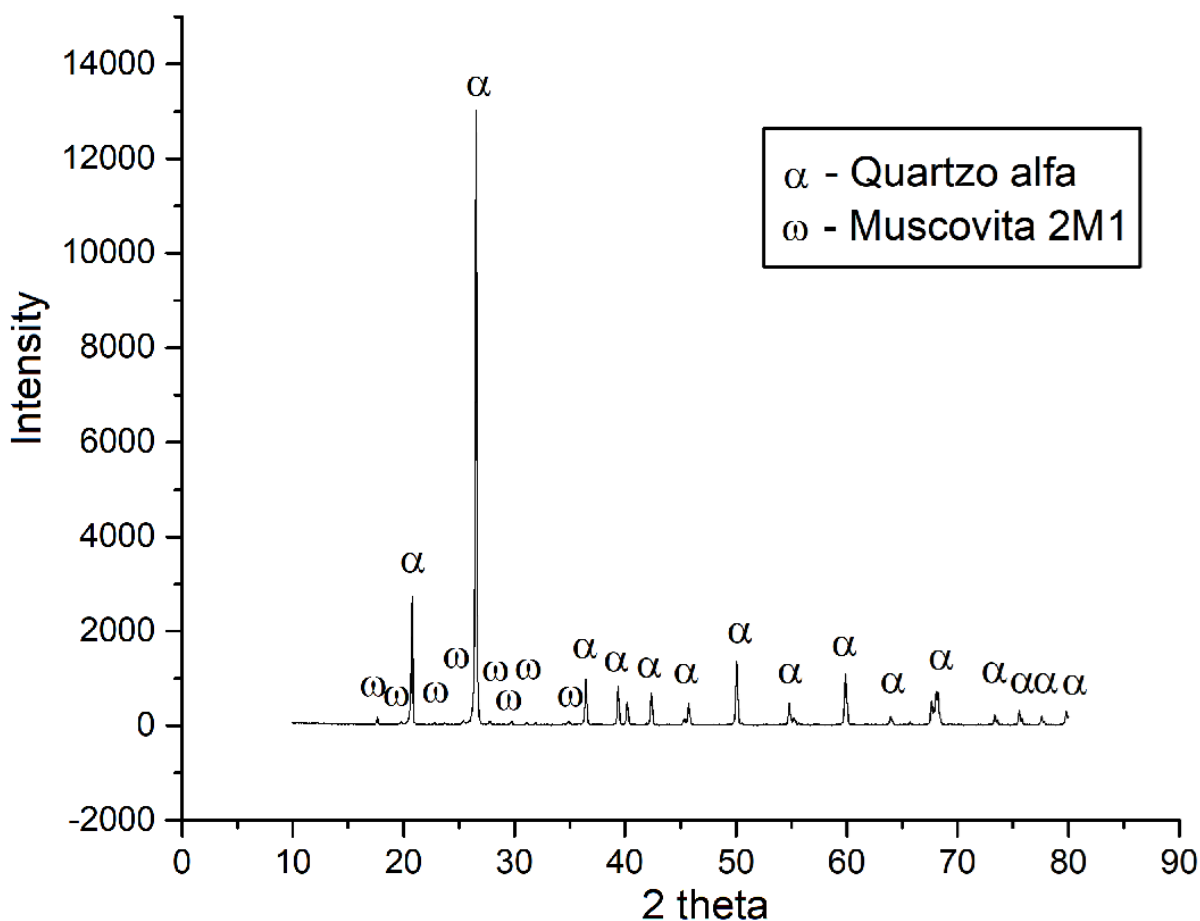
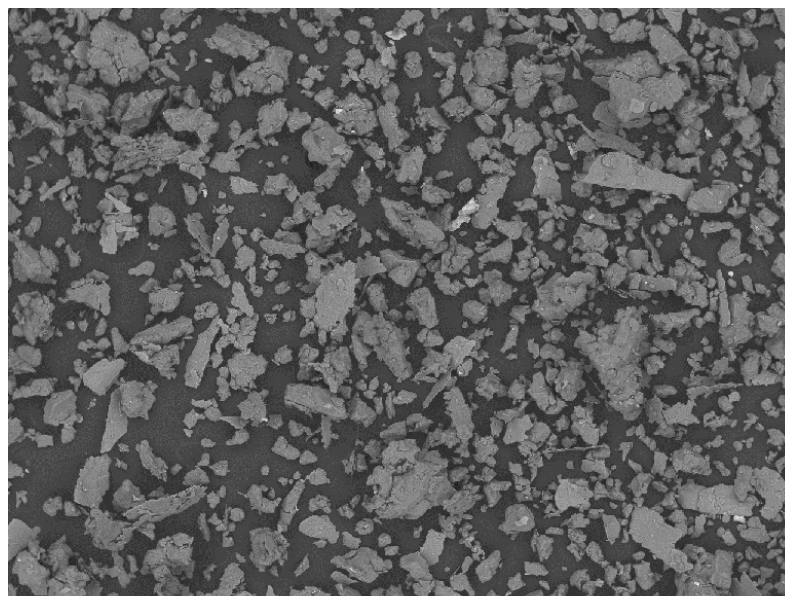


Figura 27: Gráfico de DRX.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

4.7.4 Microscopia Eletrônica de varredura – MEV

O material é muito homogêneo, podemos observar a presença das micas (M) e do quartzo (Q) nitidamente nas imagens, onde a muscovita possui essa estrutura em placas sendo essas agrupadas como livros ou livres como folhas e o quartzo possui fácies triangulares, formando pequenos prismas. A primeira imagem (Figura 28) mostra visão mais geral do quartzito e a segunda mostra mais detalhada (Figura 29).

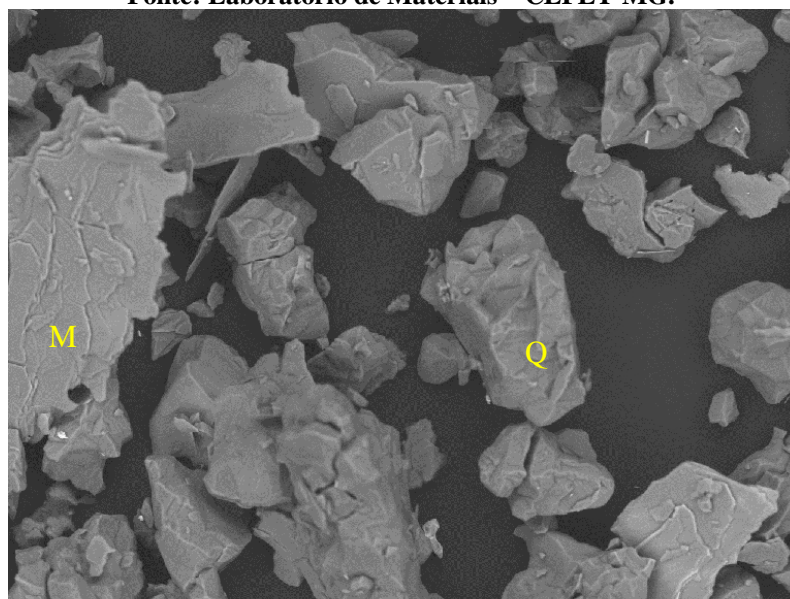


TM3000_7754

H D4,5 x100 1 mm

CEFET-MG - DET

**Figura 28: Visão Geral do Quartzito (MEV).
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.**



TM3000_7753

H D4,5 x500 200 um

CEFET-MG - DET

**Figura 29: Visão detalhada do Quartzito (MEV), letra M representa a Muscovita e a letra Q o Quartzo.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.**

É possível observar que os cristais de quartzo se apresentam aglutinados, vários cristais que se desenvolveram dentro de um mesmo agregado cristalino. Conseguimos observar tanto os cristais liberados com suas fácies prismáticas como os cristais juntos no agregado. É possível notar na Figura 30 que alguns cristais de quartzo se soltaram do agregado deixando

literalmente buracos na estrutura. Na Figura 31 vemos nitidamente a estrutura em camadas formadas pelas placas de muscovita.

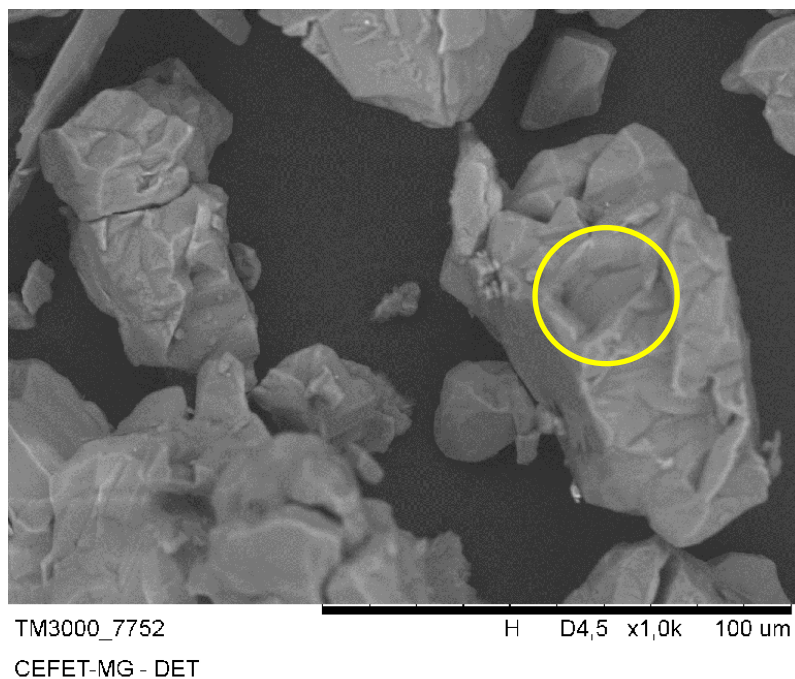


Figura 30: Buracos deixados no agregado cristalino.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

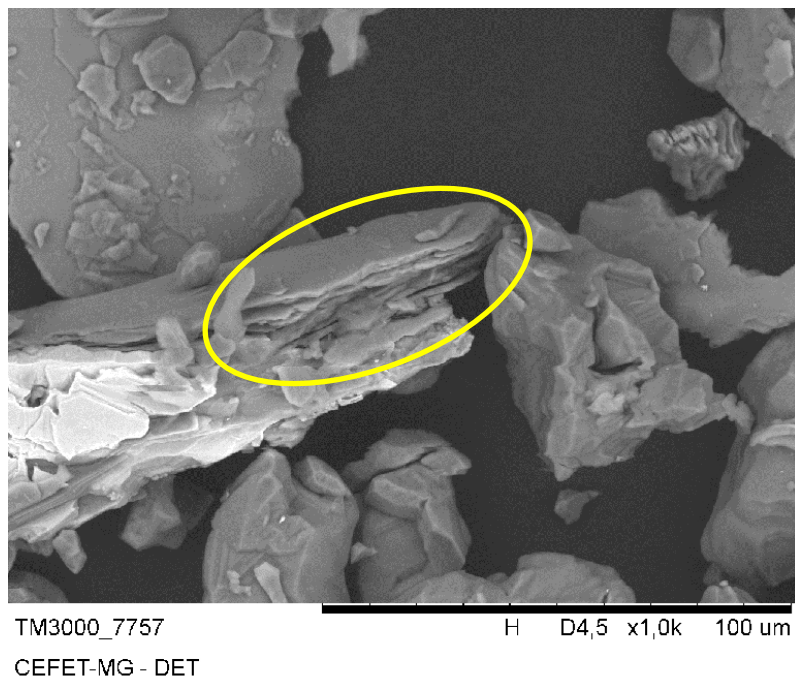
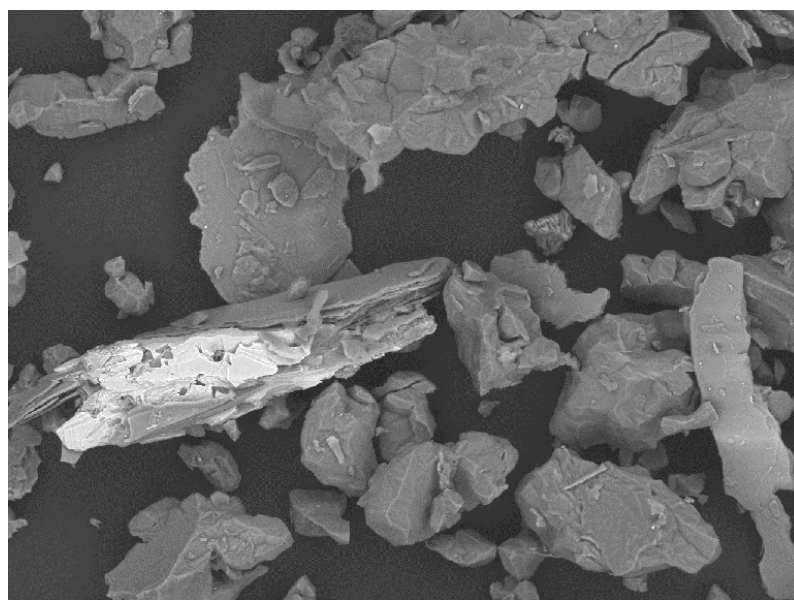


Figura 31: Camadas formadas pelas moscovitas.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

As Figuras 32 e 33 mostram, respectivamente, uma muscovita em meio a vários cristais e um zoom dado sob a mesma muscovita. As placas que compõem sua estrutura podem ser vistas nitidamente como folhas empilhadas.

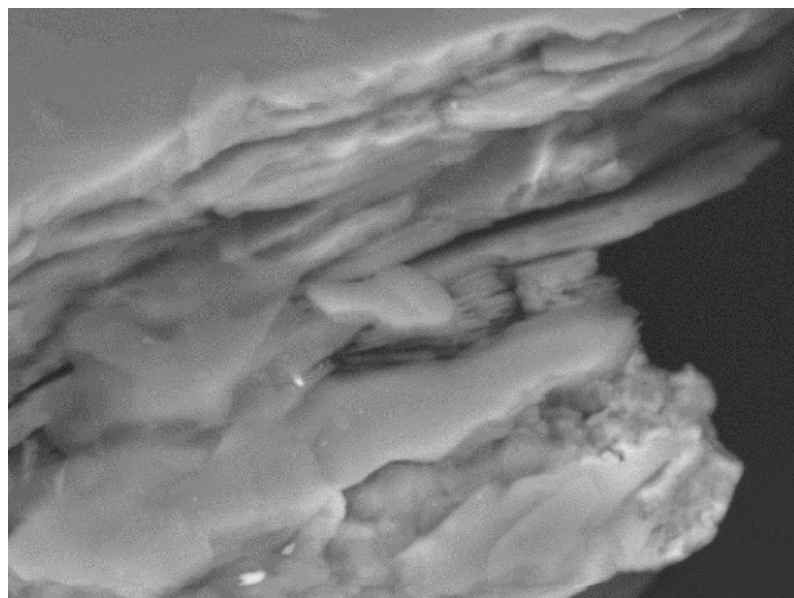


TM3000_7758

H D4,5 x500 200 um

CEFET-MG - DET

**Figura 32: Muscovita em meio aos cristais.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.**



TM3000_7756

H D4,5 x5,0k 20 um

CEFET-MG - DET

**Figura 33: Zoom da estrutura da muscovita.
Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.**

O intemperismo desagrega os cristais individualmente, então a preservação dessa estrutura cristalina mostra que a rocha original não desagregou totalmente com a ação do intemperismo. Esse processo de desagregação incompleta envolve as micas também.

4.7.5 Avaliação da incorporação na indústria cerâmica pelos resultados das análises químicas.

Como já demonstrado os resultados das análises químicas realizadas com o quartzito foi possível perceber sua semelhança com as matérias primas utilizadas pela indústria cerâmica do ramo de revestimentos. Comparando as tabelas 4 e 5 que representam as análises de FRX realizadas em outros estudos com a tabela 10 que representa o resultado da análise de FRX do quartzito alterado, podemos perceber as semelhanças químicas entre elas, tabela 11. Essa semelhança demonstra a viabilidade de incorporação do quartzito alterado na rota das indústrias cerâmicas de revestimento como matéria prima.

Tabela 11 – Comparação entre os quartzitos utilizados na bibliográfica e o quartzito alterado.

| Composição | Quartzito alterado | Quartzito, M. E. Resíduo de Quartzito | |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | | A. Carreiro <i>et al</i> (2016) | J. M. S. Moreira <i>et al</i> (2005) |
| SiO ₂ | 85.530 | 92,56 | 83,13 |
| Al ₂ O ₃ | 9.525 | 3,207 | 9,99 |
| K ₂ O | 2.477 | 2,208 | 3,33 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.547 | 1,08 | 0,94 |
| SO ₃ | 0.371 | 0,467 | - |
| TiO ₂ | 0.277 | 0,165 | 0,13 |
| BaO | 0.197 | - | - |
| ZrO ₂ | 0.059 | - | - |
| SrO | 0.010 | - | - |
| Rb ₂ O | 0.006 | - | - |

Todos os valores encontrados destacados para cada elemento na análise química por FRX feita com a amostra de quartzito alterado foram muito semelhantes aos valores das composições químicas de outros quartzitos também estudados objetivando descobrir sua

viabilidade de incorporação na cerâmica substituindo o quartzo. Podemos salientar alguns deles, os valores encontrados por M. E. A. Carreiro *et al* (2016) na tabela 4 de SiO₂ (92,567%), K₂O (2,208), Fe₂O₃ (1,08) e TiO₂ (0,165) são muitos semelhantes aos valores encontrados no estudo de J. M. S. Moreira *et al* (2005) na tabela 5 de SiO₂ (83,13%), K₂O (3,33), Fe₂O₃ (0,94) e TiO₂ (0,13). Ambos apresentam valores muito semelhantes aos encontrados na análise do quartzito alterado na tabela 9 de SiO₂ (85,53%), K₂O (2,477), Fe₂O₃ (1,08) e TiO₂ (0,277).

Os resultados encontrados a partir da análise de DRX da amostra de quartzito, Figura 27, mostram picos característicos de cada componente presente na amostra, o pico de maior intensidade de quartzo e os de menor intensidade de muscovita. As análises de DRX presentes na literatura também apresentam picos de intensidade característicos semelhantes, a análise realizada por M. E. A. Carreiro *et al.* (2016), figura 9, apresenta pico de maior intensidade de quartzo e picos de menor intensidade de feldspato e mica. J. M. S. Moreira *et al* (2005) também encontrou picos semelhantes na análise de DRX, figura 10A um pico de maior intensidade de quartzo e picos de menor intensidade de microlina e muscovita

5 CONCLUSÕES

Através do estudo e comparação com a bibliográfica podemos afirmar que o quartzito alterado tem grande potencial para uso no setor ceramista já que possui altos teores de sílica (>80%) e se assemelha bastante com a matéria prima original, o quartzo. E como foi provado nos ensaios físicos, tem características semelhantes nos quesitos de perda ao fogo e granulometria. Essa matéria prima quando utilizada atuará no controle de dilatação e no ajuste da viscosidade da fase líquida formada durante a queima e facilita no processo de secagem e na liberação dos gases durante o processo de queima.

O uso do quartzito influenciará na resistência mecânica, estabilidade dimensional a temperaturas elevadas.

De acordo com o resultado do ensaio de FRX e comparação com a bibliografia, o quartzito pode ser utilizado com matéria prima de característica refrataria, por apresentar um teor de sílica elevado e baixos teores de ferro e titânio.

Os minerais detectados no ensaio de DRX no quartzito estão geralmente presentes nas matérias-primas utilizadas para a produção das cerâmicas tradicionais, tornando possível a sua incorporação.

No difratograma do quartzito, observa-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo (SiO_2) que é um mineral responsável pelo desenvolvimento de plasticidade e apresenta comportamento de queima refratário, a mica muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$), pode atuar como material fundente. Todos os minerais detectados no ensaio de DRX no quartzito estão geralmente presentes nas matérias-primas utilizadas para a produção das cerâmicas tradicionais, tornando possível a sua incorporação.

6 SUGESTÕES

- Examinar a viabilidade econômica da extração e beneficiamento desse material;
- Pesquisar o desempenho deste material na indústria cerâmica através de ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. F. **Recursos Minerais do Brasil**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1973. V. 1, 360 p.
- ALBUQUERQUE, F. R. et al. **Planejamento Experimental Aplicado à Otimização de Massas Cerâmicas contendo Matérias-primas Naturais**. Cerâmica, vol. 53, p.300-308, 2007.
- ALBUQUERQUE, L. M. C. **Reciclagem e estudo de reaproveitamento de resíduos cerâmicos de indústria de louça sanitária**. Recife: Centro de tecnologia e geociências da Universidade Federal de Pernambuco, 2009. 62p. (Dissertação, Mestrado, Materiais e Fabricação).
- ALVES M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. (Dissertação, Mestrado, Materiais de Construção Civil), Escola de Engenharia de UFMG, Belo Horizonte. 132 p.2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457** – Amstras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459** – Solo – Determinação do limite de liquidez. 1984
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180** – Solo – Determinação do limite de plasticidade. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18** – Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor de rochas ornamentais e de revestimento**. Informe 005/2006. São Paulo. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Os Quartzitos De São Thomé Das Letras, Minas Gerais: Principais Demandas Para O Desenvolvimento Sustentável Da Atividade Produtiva**. São Paulo. 2003.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br>. Acesso em: 01 de jun. 2018.
- BARBA, A.,et al. **Materias Primas Para la Fabricación de Soportes de Baldosas Cerámicas**. 2ª Ed, Castellón - España, Instituto de Tecnologia Cerámica - ITC, 292p. 2002
- BECKHOFF B.; KANNGIEBER B.; LANGHOOF N.; WEDELL R.; WOLFF H. **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis**. 1 ed. Berlin-London: Springer. 433p. 2006.

BIFFI, G. **O grês porcelanato: manual de fabricação e técnicas de emprego**. 3ª ed. São Paulo: Faenza Editrice do Brasil Ltda, 262p, 2002.

CALLISTER, JR.; WILLIAN. D. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. 5.ed., Rio de Janeiro: LTC,2002. p.292.

CAMPOS NETO, M. C. Litoestratigrafia, relações estratigráficas e evolução paleogeográfica dos grupos Canastra e Paranoá (região de Vazante-Lagamar, MG). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 14, p. 81-91, 1984a.

CAMPOS NETO, M. C. Geometria das fases de dobramento brasileiras superpostas no Oeste de MG. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 14, p. 81- 91, 1984b.

CARREIRO, M. E. A. et al. **Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural**. Cerâmica, São Paulo , v. 62, n. 362, p. 170-178, jun. 2016 .

CAVALCANTE, W. F. V. **Aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massas para revestimento cerâmico**. Recife: Centro de tecnologia e geociências da Universidade Federal de Pernambuco, 2005. 63p. (Dissertação, Mestrado, Materiais e Fabricação).

CODEMIG - COMPANIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Mapa Geológico – Folha Sacramento** Secretária de Estado de Desenvolvimento Econômico. 2017. Escala 1:100000.

COSTA, Jussara Ismênia. **Caracterização mineralógica e tecnológica de uma jazida de serpentinito como rocha ornamental**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

CURI, A. **Avaliação da mineração de quartzitos em Ouro Preto**. 10º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental, 2002.

DANA, J.D. **Manual de Mineralogia**, 3ª ed. Revisada e atual. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.: Rio de Janeiro, 152p., 1976.

DEMBSKY J. Rocks. Disponível em <http://www.dembsky.net/rocks/>. Acesso em 15 de Maio 2018.

DIAS P.H.A. et al. **Folha São Gotardo SE.23-Y-D-I, Carta Geológica 1:100.000**. Belo Horizonte, Convênio CODEMIG-CPRM/UFMGIGC-CPMTC, 1 mapa. 2011.

FRAZÃO, E.B. PARAGUASSU, A. B. **Materiais rochosos para construção**. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA. *Geologia de engenharia*. São Paulo: ABGE, p. 331-342. 1998.

FUCK, R. A. et al. **A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica na Província Tocantins**. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 4, 1994, Brasília, 1994. p. 184-187.

GOMES, C.F. **Argilas o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 449p, 1986.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. New York: McGraw-Hill, Geological Science Series 29p., 1958.

J. M. S. MOREIRA; J. P. V. T. MANHÃES; J. N. F. HOLANDA. **Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha**. Cerâmica vol.51 no.319, São Paulo (2005).

MÁS, E.(2002). **Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha**. Editora Pólo Produções LTDA, São Paulo. (Apostilas).

MOTTA, J. F. M., CABRAL JUNIOR, M., TANNO, L. C. **Panorama das Materias Primas Utilizadas na Industria de Revestimentos Ceramicos: Desafios ao Setor Produtivo**. Cerâmica Industrial, v. 3, n. 4-6, p. 30-38, 1998.

OLIVEIRA, A. P. N. **Grês porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos**. Cerâmica Industrial, v. 3, n. 3, p. 34-41, 1998

PEREIRA, L. F. **Relações tectono-estratigráficas entre as unidades Canastra e Ibiá na região de Coromandel-MG**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília.

PEREIRA, L. et al. **Evolução Geológica dos Grupos Canastra e Ibiá na região entre Coromandel e Guarda-Mor, MG**. *Geonomos*, v. 2, p. 22-32, 1994.

PERSONN, L. V. **Rocks and rocks minerals**. Revised by Adolph Knopf. Jho Wiley & Sons, New York – London. 3 ed. 1946.

PIANARO, S. A. **Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grês porcelanato**. Revista Cerâmica Industrial, v. 9, n.1, p. 33-38, 2004.

PIRES, P. R. **Caracterização sócio-econômica e ambiental da atividade do tratamento de quartzito na Região de Ouro Preto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. 2007.

ROCHA, D. A história de um pioneiro que descobriu o mármore branco de Mar de Espanha. **Revista Rochas de Qualidade**, São Paulo, n. 78, p. 7-12, abr./maio. 1984.

SANCHEZ, E. et al. **Efeito da Composição das Matérias-Primas empregadas na fabricação de grês porcelanato sobre as fases formadas durante a queima e as propriedades do produto final.** Cerâmica Industrial, v. 6, n. 5, p. 15-22, 2001.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas: aplicada às argilas brasileiras.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1975. v. 2: Aplicações.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, volume 1 e 2 São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1989.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de Argilas.** Aplicações. 2.a edição revisada e ampliada. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1992. V. 2. 446 p.

SEER, H.J. **Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá,** Araxá, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 1999.

VALERA, T.S., RIBEIRO, A.P. VALENZUELA-DÍAZ, F.R., et.al. **The effect of phyllite as a filler for PVC plastisols.** In: Annual Technical Conference. Society of Plastics Engineers. 2002. V. 60, no 3, p. 3949–3953.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** Tradução: Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

VILLELA, C.M. **Artes e ofícios. A cantaria mineira.** 2003