



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



MIRIAM GOMES MARTINS

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA ARGILA DA REGIÃO NORTE DE MINAS GERAIS  
PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

OURO PRETO  
2021

MIRIAM GOMES MARTINS

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA ARGILA DA REGIÃO NORTE DE MINAS GERAIS  
PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para a obtenção de título de bacharel em engenharia de minas.

Orientadora: Prof. Dra. Érica Linhares Reis

Co-Orientadora: Msc. Mariana Caroline  
Andrade Silva

OURO PRETO  
2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M386c Martins, Miriam Gomes.

Caracterização de uma argila da região norte de Minas Gerais para aplicações industriais. [manuscrito] / Miriam Gomes Martins. - 2021. 52 f.: il.: color., gráf., tab.. + Organograma.

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.

Coorientadora: Ma. Mariana Caroline Andrade Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Argila. 3. Caulinita. I. Reis, Érica Linhares. II. Silva, Mariana Caroline Andrade. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.361.1

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e nove dias do mês de março de 2021, às 14h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Miriam Gomes Martins**, matrícula 16.1.1468, intitulado: **CARACTERIZAÇÃO DE UMA ARGILA DA REGIÃO NORTE DE MINAS**

**GERAIS PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**, perante comissão avaliadora constituída pela orientadora do trabalho, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Érica Linhares Reis, M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva (Co-orientadora e Presidente da banca), Eng<sup>a</sup> de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa e M.Sc. Flávio Luiz Martins. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, a presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, a presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a Eng<sup>a</sup> de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa; segundo, M.Sc. Flávio Luiz Martins e em último, a M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, a presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi **aprovada** por unanimidade, com a nota **9,0 (nove)**, sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. A discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 29 de março de 2021.

Presidente: M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva

Membro: Eng<sup>a</sup> de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa

Membro: M.Sc. Flávio Luiz Martins

Discente: Miriam Gomes Martins

À minha vó Neuza (“*in memoriam*”) e à minha Mãe Ana, essas mulheres são meus exemplos de força e persistência. Aos meus familiares que sempre me apoiaram. Ao meu irmão Brêndon e aos meus sobrinhos por me darem paz e calma nos dias necessários. Aos meus amigos e professores que sempre acreditaram em meu potencial.

## **AGRADECIMENTOS**

Esta foi uma longa jornada de altos e baixos que me proporcionou experiências e aprendizados sem iguais. Estar em uma universidade federal mesmo com todas as minhas poucas condições socioeconômicas e ser a primeira do meu núcleo familiar a conseguir tal façanha é um orgulho pra mim, principalmente por ter despertado em minhas linhagens familiares a vontade de fazer o mesmo, de mudar a sua condição e de se tornar vencedores donos de seus respectivos destinos. Isso tudo é motivo de muita gratidão e agradecimento.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ser meu suporte e guia durante todo esse percurso. A ele toda a minha honra e toda glória porque sem ele eu nada sou. A Nossa Senhora, Mãezinha e minha, por sempre me acolher em minhas orações e caminhar comigo nos momentos que necessitei.

Aos meus familiares pelo apoio incondicional, principalmente a minha mãe (Ana), minha vó Neuza (In memorial) por serem as mulheres nas quais eu me espelho na vida, pela força, garra, dedicação e amor com todos e tudo. Ao meu irmão (Brêndon), meus sobrinhos (Brayan, Miguel, Luiz e Arthur), aos meus afilhados (Cecília, Felipe, Alice, Hadryan), a minha Madrinha (Wilma) pelo afeto, conselhos, companheirismo, dedicação e colaboração nesta jornada. Um agradecimento especial as minhas tias (Maria, Luciane, Luzinete e Taís) por serem quase minhas segundas mães e me acolherem no colo sempre que necessário.

As minhas queridas orientadora e Prof. Dr<sup>a</sup>. Érica Linhares Reis e coorientadora e Mestranda Mariana Caroline Andrade Silva, por aceitarem me orientar neste momento tão importante, me auxiliarem nessa caminhada árdua, serem compreensivas, colaborativas, e fundamentais para o meu bom desenvolvimento.

Aos meus mestres e amigos, Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira e a Dr. Francielly Nogueira, por me ensinarem a ser mais humana perante este curso, sendo companheiros, compreensivos e me transformarem, em cada projeto, em uma profissional muito melhor.

Aos amigos do curso (grupo friends), em especial Vitor Gomes, Carolina Mendonça, Valéria Lima e Polyana Amorim por estarem ao meu lado durante todo o

processo deste trabalho, me auxiliando em tudo o que foi necessário e oferecendo uma amizade sem igual que pretendo levar por toda a vida.

Ao DEMIN (Departamento de Engenharia de Minas) e aos professores deste por agregarem à minha vida conhecimento pessoal, profissional, técnico e humano. A LATRAM (Liga Acadêmica de Tratamento de Minérios) e ao CREA Jr. Núcleo Ouro Preto por serem movimentos estudantis fundamentais para o meu crescimento e postura profissional

Aos amigos e amigas de toda a vida (Ana Carolina, Camila, Fernanda, Ingrid, Letícia, Jordanny, Orlando, Pedro, Samantha, Tamara, Vitória, Yara) que sempre acreditaram em meu potencial, mesmo que eu mesma não acreditasse, me apoiaram nos momentos mais complexos e desesperadores e dividiram comigo as maiores alegrias e dores durante este curso.

Ao JEFIC (Juventude Esperança Formação Inovação em Cristo), GOU (Grupo de Oração Universitário), EJC (Encontro de Jovens com Cristo) e Congregação Mariana por serem os movimentos religiosos que me proporcionaram forças, calma, serenidade, entrega e suporte para passar por todas as fases difíceis durante esta experiência.

Ao GAAS (Grupo Assistencial Auta de Souza) que me permitiu um desenvolvimento humano sem igual, a cada criança que foi beneficiada pelos projetos que participei neste local e me proporcionaram uma troca de conhecimentos única, mágica e que definiu muito de quem eu sou hoje.

Aos membros da Banca Mestre Flávio Luiz Martins e Engenheira de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa por aceitarem serem semeadores de conhecimento, sendo fundamentais no que se trata avaliar, corrigir e aconselhar o meu trabalho, dando seu tempo, disponibilidade e compromisso.

E por fim, e com muita importância, eu agradeço a PRACE (Pró -Reitoria de Assistência Estudantil), pois somente com os auxílios prestados por essa pró-reitoria foi possível permanecer na faculdade e chegar até aqui.

*“Estude. Trabalhe. Persista. Faça mais do  
que as pessoas esperam de você.”*

**Astronauta Marcos Pontes.**



*“Tudo posso naquele que me fortalece...”*  
**Filipenses 4:13**

## RESUMO

A argila é um material relativamente abundante e de baixo custo para aplicação industrial. Por se tratarem de materiais com ampla composição mineralógica, as argilas são foco de estudos de vários segmentos, como farmacêuticos, cosméticos, agrônomos, químicos, de tecnologias dos materiais, entre outros. Esta ampla gama de utilização faz com que haja um aumento no número de estudos nesta área, afim de definir parâmetros e melhores formas de aplicabilidades desses materiais. Neste contexto, esse trabalho buscou estudar a aplicabilidade de uma argila do Norte de Minas Gerais para as indústrias de decorante, cerâmica branca e papel, com base em técnicas de caracterização incluindo análise granulométrica, análise termogravimétrica, umidade, peso específico, análise mineralógica e limites de Atterberg. Mineralogicamente, a argila é constituída por 78% de caulinita e 22% de quartzo. As transformações apontadas a partir dos picos apresentados na curva termogravimétrica estão de acordo com a literatura referente a materiais argilosos. Na análise granulométrica, 100% das partículas são menores que 2mm e aproximadamente 10% das partículas são menores que 2 $\mu$ m, a amostra possui uma umidade geral de 28,07% e peso específico de 2,45 g/cm<sup>3</sup>. Os limites de Atterberg alcançaram os valores de 53,57% para a liquidez, 40,97% para plasticidade e índice de plasticidade de 12,60% implicando na classificação deste material como medianamente plástico. A partir destes resultados, as melhores aplicações industriais para este material são como carga para papel, desde que o material passe por um processo de secagem e classificação efetiva; e como cerâmica branca, desde que o material seja enriquecido em processos de concentração. Porém há necessidade de estudos mais profundos e testes posteriores como os testes de alvura, brancura, amarelamento e cor de queima, que não puderam ser realizados devido a pandemia da COVID-19.

**Palavras Chaves:** caracterização, argila, caulinita, aplicação industrial.

## **ABSTRACT**

Clay is a relatively abundant and low-cost material for industrial applications. As they are materials with a wide mineralogical composition, clays are the focus of studies in various segments, such as pharmaceuticals, cosmetics, agronomists, chemists, material technologies, among others and this wide range of use causes an increase in the number studies in this area, in order to define parameters and better forms of applicability of these materials. In this context, this work sought to study the applicability of a clay from the North of Minas Gerais for the bleaching, white ceramic and paper industries, based on characterization techniques including granulometric analysis, thermogravimetric analysis, humidity, specific weight, mineralogical analysis and Atterberg limits. Mineralogically, the clay is found by 78% of kaolinite and 22% of quartz. The transformations pointed out from the peaks performed on the thermogravimetric curve are in accordance with the literature. In the granulometric analysis, 100% of the particles are smaller than 2 mm and approximately 10% of the particles are smaller than 2  $\mu\text{m}$ , the sample has an overall humidity of 28.07% and a specific weight of 2.45 g /  $\text{cm}^3$ . Atterberg's limits reached the values of 53.57% for liquidity, 40.97% for plasticity and Plasticity index of 12.60%, implying in the classification of this material as moderately plastic. Based on these results, the best industrial applications for this material are the used for pape's filler, once the material undergoes is an drying and effective classification process. And for the production of white ceramic as long as the material has been enriched in a concentration process. However, there is a need for further studies and further tests such as brightness, whiteness, yellowing, burning color tests, which could not be performed due to the COVID-19 pandemic.

**Keywords:** characterization, clay, kaolinite, industrial application

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> – Diagrama esquemático de uma folha tetraédrica (A) e uma folha octaédrica (B).....	17
<b>Figura 2</b> – Representação esquemática de um argilomineral 1:1 (a) e 2:1 (b)....	18
<b>Figura 3</b> – Representação esquemática geral da estrutura de uma esmectita...20	
<b>Figura 4</b> – Diagrama simplificado do beneficiamento do caulim, via úmida.....	24
<b>Figura 5</b> – Organograma da metodologia.....	31
<b>Figura 6</b> - Estados de consistência.....	34
<b>Figura 7</b> – Análise granulométrica da argila em estudo.....	37
<b>Figura 8</b> – Difratoograma de raio X da argila em estudo. ....	38
<b>Figura 9</b> – Análise termogravimétrica da amostra de argila.....	39
<b>Figura A1</b> – Representação do sistema colorimétrico CIEL*a*b*.....	49
<b>Figura A2</b> – Esquema do cálculo dos valores tristímulus em um colorímetro....	50
<b>Figura A3</b> – Esquema do cálculo dos valores tristímulus em um espectrofotômetro.....	50

## **Listas de Tabelas**

<b>Tabela 1</b> – Parâmetros para aplicação na indústria do papel como carga e cobertura.....	25
<b>Tabela 2</b> – Classificação preliminar de argilas para uso cerâmico com base nas cores apresentadas após queima.....	27
<b>Figura 3</b> – Características físico-químicas e cerâmicas das argilas de São Simão (SP) e Oeiras (PI).....	28
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros para aplicação como cerâmica branca.....	29
<b>Tabela 5</b> – Parâmetros para aplicação na indústria de descorantes.....	30
<b>Tabela 6</b> – Análise da umidade da amostra geral.....	36
<b>Tabela 7</b> – Valores do peso específico da argila obtidos pelo ensaio de picnometria.....	40
<b>Tabela 8</b> – Limites de Atterberg.....	41

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral .....	15
2.2	Objetivos específicos .....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1	Argilas .....	16
3.1.1	Argilas comuns ( <i>comom clay</i> ).....	18
3.1.2	Argilas plásticas ( <i>ball clays</i> );.....	19
3.1.3	Argilas refratárias ( <i>fire clays</i> ).....	19
3.1.4	Argilas bentonitas ( <i>esmectita</i> ).....	19
3.2	Argilas caulins ( <i>china clay</i> );.....	20
3.2.1	Tipos de depósitos de caulim no Brasil.....	21
3.2.2	Mineração e beneficiamento do caulim.....	22
3.2.3	Aplicações na indústria .....	24
3.2.3.1	Papel .....	24
3.2.3.2	Cerâmica Branca .....	26
3.2.3.3	Descorante .....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1	Umidade .....	32
4.2	Quarteamento.....	32
4.3	Análise granulométrica.....	32
4.4	Análise mineralógica .....	32
4.5	Análise termogravimétrica .....	33
4.6	Peso específico.....	33
4.8	Limites de Atterberg .....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
5.2	Umidade.....	36
5.3	Análise granulométrica.....	36
5.4	Análise mineralógica.....	37
5.5	Análise termogravimétrica.....	38
5.6	Peso específico.....	40
5.7	Limites de Atterberg.....	40
6	CONCLUSÕES.....	42
	REFERÊNCIAS .....	44
	APÊNDICE A .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Santos (1989), a argila é uma rocha finamente dividida, natural, terrosa, de granulação fina (menor que  $2 \mu m$ ), que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade e é constituída essencialmente por argilominerais. Coelho *et al.* (2007a) relata que existem em média 40 argilominerais e alguns destes possuem características peculiares e específicas, que serão responsáveis pelo seu valor tecnológico e aplicação na indústria.

A argila é objeto de estudos em diversas áreas industriais como: química, farmacêutica, mineralógica, agrônoma, tecnologia dos materiais e isto acarreta na necessidade de estudos mais profundos de qualificação de suas aplicações (Teixeira-Neto *et al.*, 2009). No Brasil, as indústrias que mais aplicam argilas são: a) a indústria cerâmica, b) a indústria do papel e do papelão, que utilizam argila como carga ou cobertura e c) as indústrias de óleos comestíveis e derivados de petróleo, que utilizam argila como agentes descorantes de óleos vegetais e minerais (SANTOS, 1989).

As argilas são relativamente abundantes, apresentam baixo custo e que interligado ao seu potencial de uso, atraem atenção da comunidade científica e industrial. (BRITO *et al.*, 2015).

A argila em estudo é proveniente dos vales fluviais dos rios Mucuri e Jequitinhonha (MG) do Norte Mineiro, em específico do Município de Novo Cruzeiro. O setor nordeste corresponde a uma área de aproximadamente 7.700 km<sup>2</sup> e possui potencial para argilas cauliníticas.

Segundo Brito *et al.* (2015), devido a sua variação mineralógica e o grau de alteração das rochas argilosas, torna-se complexo o estudo para definição de parâmetros adequados para aplicação deste material em ramos industriais. Neste contexto se insere este trabalho, com a proposta de avaliar as possíveis aplicações industriais de uma argila oriunda do Norte de Minas, na produção de cerâmica branca, descorante e papel.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

- a) Caracterizar uma amostra de argila proveniente do norte de Minas e avaliar suas possíveis aplicações industriais.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Caracterizar mineralógica, termogravimétrica e granulometricamente a amostra de argila utilizada.
- b) Determinar umidade e os limites de plasticidade e de liquidez (“Limites de Atterberg”) da amostra de argila utilizada.
- c) Avaliar possíveis aplicações industriais para a argila em questão: cerâmica, matéria-prima descorante e segmento de produção de papel.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Argilas

Segundo Lucas *et al.* (2007) as argilas são rochas finamente divididas possuindo elevado teor de partículas com diâmetro equivalente a 2  $\mu\text{m}$ . Elas se originam da desagregação física ou química de uma rocha, geralmente, feldspática. Tais argilas podem ser classificadas como primárias ou secundárias. As primárias são formadas no mesmo local da rocha mãe, apresentam coloração mais clara e são pouco plásticas. As argilas secundárias são transportadas por agentes intempéricos para longe da rocha de origem, são mais finas e plásticas que as primárias.

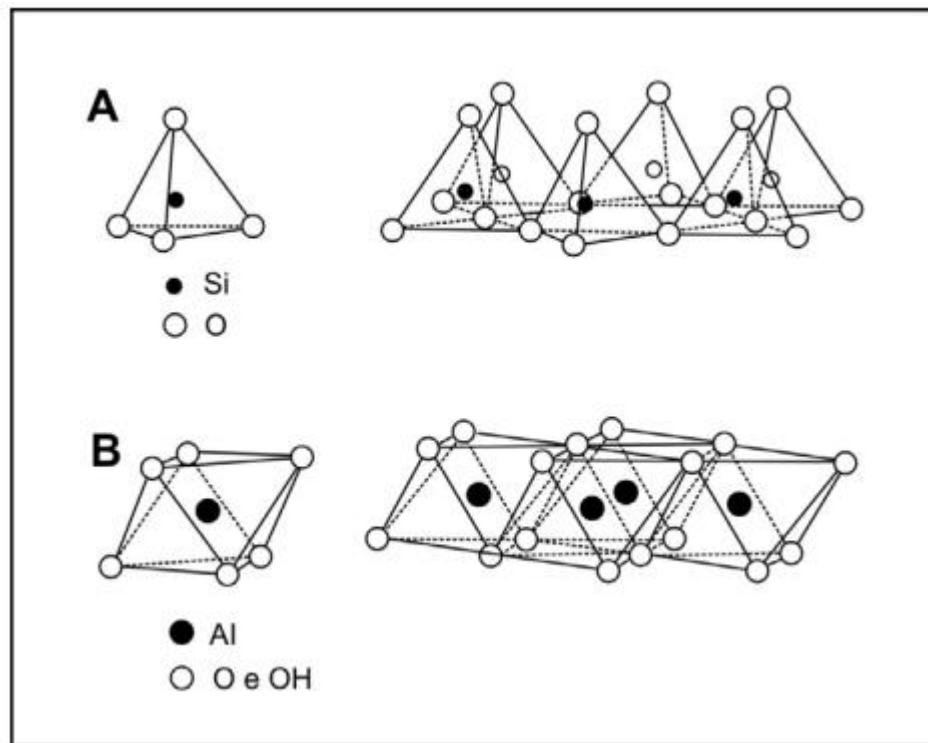
Materiais argilosos caracterizam-se por: a) serem constituídos por essencialmente argilominerais; b) possuírem elevado teor de partículas de diâmetro abaixo de 1  $\mu\text{m}$ ; c) quando umedecidos, respondem de maneira plástica; d) possuírem capacidade de troca de cátions entre 3 e 150 meq/100g de argila. (SANTOS, 1989).

Existem em média 40 argilominerais e alguns destes possuem características peculiares e específicas, que acarretam em seu valor tecnológico e aplicação na indústria (COELHO *et al* 2007a).

Santos (1989) definiu que os grupos fundamentais com os quais são construídos todos os tipos de estruturas cristalinas dos argilominerais são os grupos tetraédricos e octaédricos formados por átomos ou íons de oxigênio e de íons hidroxila ao redor de pequenos cátions. Os grupos tetraédricos estão ligados entre si formando folhas hexagonais contínuas e os grupos octaédricos estão ligados hexagonalmente em folhas octaédricas. O empilhamento de uma folha tetraédrica com uma folha octaédrica forma uma camada ("*layer*").

Segundo Coelho *et al* (2007a), os argilominerais são muitas vezes chamados "silicatos em camadas" ("*layer silicates*") ou "filossilicatos". Na Figura 1 é possível observar as estruturas octaédrica e tetraédrica dos argilominerais.

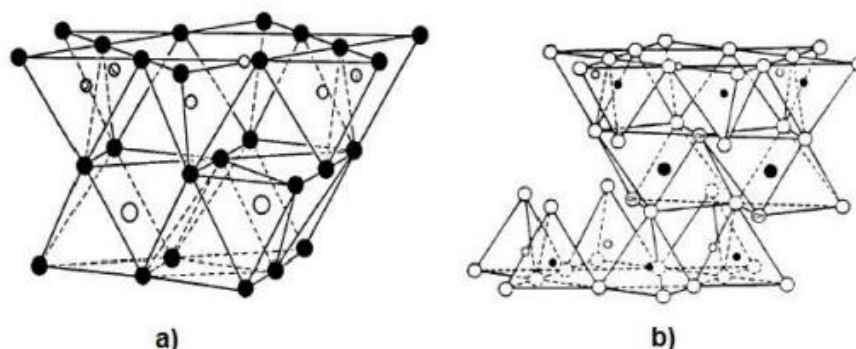
Figura 1 – Diagrama esquemático de uma folha tetraédrica (A) e uma folha octaédrica (B).



Fonte: SILVA, 2010 p. 5.

Silva (2010) destaca que a classificação do grupo das argilas se dá de acordo com o arranjo das folhas octaédricas e tetraédricas que formam lamelas segundo duas estruturas, 1:1 e 2:1. As lamelas 1:1 possuem uma folha octaédrica ligada a uma folha tetraédrica e o tipo mais comum de argila é a caulinita. As lamelas 2:1 possuem uma folha octaédrica entre duas folhas tetraédricas e o mineral montmorilonita é a mais abundante e com maior relevância tecnológica. A Figura 2 ilustra estes dois tipos de estruturas.

Figura 2 – Representação esquemática de um argilomineral 1:1 (a) e 2:1 (b).



Fonte: BALDUINO, 2016 p.6.

De acordo com Santos (1989), podem existir diferentes sequências regulares e irregulares para o empilhamento de folhas formando vários tipos de argilominerais. As ligações fracas entre as camadas são responsáveis pela fácil clivagem paralela aos planos basais, de onde resulta a forma, morfologia ou hábito lamelar da maioria dos argilominerais.

Segundo Santos (1989) é possível descrever uma argila levando em consideração a sua formação geológica, composição mineralógica, propriedades físico-químicas como distribuição granulométrica, superfície específica, viscosidade, plasticidade, entre outras características. Nota-se que não é uma classificação fácil e simples devido a tantas características e ramificações. Santos (1989) ainda utiliza a caracterização do *Bureau of Mines* dos Estados Unidos que classifica as argilas em: caulins (“*China clay*”); plásticas (“*ball clays*”); refratárias (“*fire clays*”); bentonitas (“*esmectita sódica*”); terras *fuler* (descorante ou esmectita cálcica); comuns ou diversas (“*comom clay*”). Essa classificação é utilizada para fins estatísticos de extração, produção e consumo.

### 3.1.1 Argilas comuns (*comom clay*)

As argilas comuns são aquelas sedimentares que queimam em várias tonalidades de vermelho, contendo caulinita, montmorilonita e principalmente illita, além de outras impurezas como matéria orgânica, quartzo, calcário, pirita entre outros. São utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha, na fabricação

de tijolos de alvenaria, telhas, ladrilhos de piso, manilhas, conduítes e agregados leves (SANTOS, 1989).

### **3.1.2 Argilas plásticas (*ball clays*);**

Estas argilas são de origem sedimentar, são compostas essencialmente por caulinita, com teores variáveis de illita, mica, quartzo e montmorilonita, contém também teores apresentáveis de matéria orgânica. São geralmente de granulometria mais fina que os caulins secundários, 70% da sua composição está abaixo de 2  $\mu\text{m}$ . Tais argilas são tomadas como padrões de elevada plasticidade e de resistência mecânica a cru. Os usos principais para este tipo de argila são em cerâmica branca e como carga (SANTOS, 1989).

Algumas propriedades indicativas de argilas plásticas são: a) umidade entre 18 e 22%; b) cor branca, várias tonalidades de cinza e marron, preta, rosa e bronzeada e a gradação para todas as tonalidades; c) área de superfície específica entre 8  $\text{m}^2/\text{g}$  e 40  $\text{m}^2/\text{g}$ ; d) carbono de 0,1 a 3%; e) cor após a queima pode ser branca, pêssego ou rosa; f)  $\text{SiO}_2$  de 50 a 70%; g)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 18 a 35% e h) teor médio de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  próximo de 1% (MACCUISTION E WILSON (2006) *apud* MOTTA *et al.*, 2008).

### **3.1.3 Argilas refratárias (*fire clays*)**

As argilas refratárias são predominantemente caulíníticas e se fundem acima de 1450 °C. Possuem plasticidade e menores quantidades de gibbsita e diásparo (SENNA, 2003).

Santos (1989) afirma que as argilas refratárias são usadas na fabricação de materiais refratários sílico-aluminosos e aluminosos, e como ligantes em outros produtos refratários.

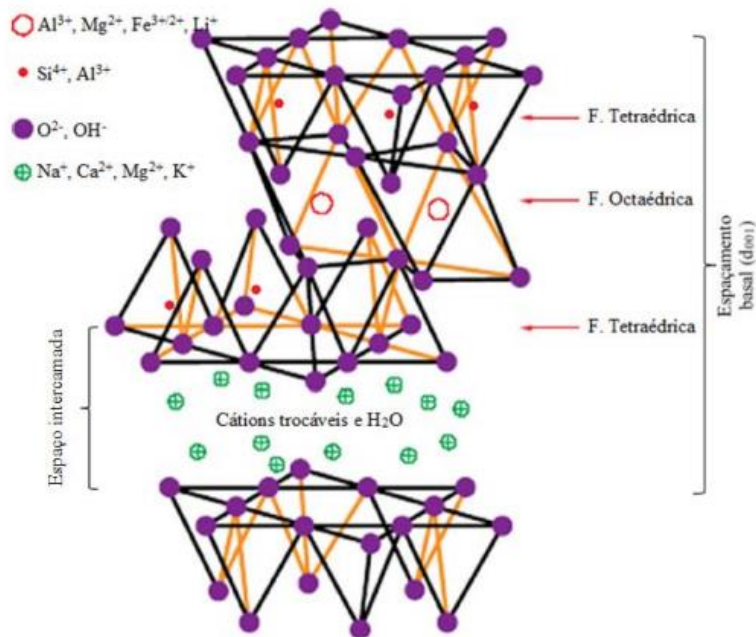
### **3.1.4 Argilas bentonitas (*esmeclita*)**

Segundo Senna (2003) a bentonita é utilizada na fabricação de pelotas de finos de minério de ferro, devido a suas propriedades aglomerantes e como carga mineral em absorventes de inseticidas. Como descorante é utilizada na indústria de óleos e gorduras alimentares, óleos minerais, de limpeza e detergentes e na produção de enxofre. É um dos melhores clarificantes quando tratada com HCl e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Santos (1989) discute que todos os tipos de bentonita possuem algum ou vários argilominerais do grupo da esmeclita e que a montmorilonita é o principal

argilomineral. Existem dois tipos de bentonitas para uso industrial: as que expandem e as que não expandem. As bentonitas que expandem possuem o sódio como principal cátion interlamelar, incham em até vinte vezes o volume de argila seca, quando imersas em água e são denominadas esmectitas sódicas. Suas principais aplicações são nas indústrias química, cerâmica, metalurgia, petróleo e farmacêuticas. Já as bentonitas que apresentam cálcio ou magnésio como cátion predominante, não expandem em presença de água e são utilizadas no descoramento ou branqueamento de óleos minerais, vegetais e animais. Neste último caso a bentonita pode receber a nomenclatura de esmectita cálcica, descorante ou terra *Fuller*. A Figura 3 apresenta esquematicamente a estrutura de uma esmectita.

Figura 3 – Representação esquemática geral da estrutura de uma esmectita.



Fonte: CARMO, 2015 p.8.

### 3.2 Argilas caulins (*china clay*);

Os caulins são o produto resultante da ação do intemperismo ou hidrotermalismo sobre rochas feldspáticas. Podem ser chamados de primários quando estão no local da rocha de origem ou secundários quando são transportados por correntes fluviais e depois sedimentadas. Os caulins primários possuem o teor de argilominerais aproximadamente de 10% e os minerais normalmente encontrados são caulinita e/ou haloisita, já os caulins secundários

possuem teores superiores a 90% de argilominerais e o argilomineral geralmente presente é a caulinita (SANTOS, 1989).

Senna (2003) evidencia que as principais propriedades que acarretaram num interesse em aplicação industrial deste tipo de argila são: alvura, boa capacidade de enchimento (“*filling*”) e cobertura (“*coating*”), baixa condutividade termo-elétrica, baixo custo de produção, variedade de produtos, entre outros.

Santos (1989) relata que a ordem decrescente de maior aplicação industrial do caulim em países industrializados estrangeiros é: papel, borracha e cerâmica. Este material é utilizado também, em menores proporções, como carga, na indústria química, farmacêutica e de cosméticos.

### **3.2.1 Tipos de depósitos de caulim no Brasil**

O caulim possui diversas características que levam a sua aplicação tecnológica. Pode-se destacar: elevada alvura, macio, o que acarreta baixa abrasão, como pigmento possui alto poder de cobertura, como carga é um bom reforçador, quimicamente inerte com pH entre 3 e 9, bom isolante possuindo baixa condutividade térmica e elétrica. Além destas características pode-se classificar os depósitos de caulim como: primário e secundário. (VIEIRA, 2018).

Segundo Criscuolo (2008), caulins primários são aqueles que foram formados da alteração de rochas cristalinas como granitos ou gnaisses, e que permanecem no local onde foram formados. O mecanismo da alteração pode ser intemperismo, diagênese ou hidrotermal.

“Os caulins secundários são formados pela deposição de sedimentos em ambientes lacustres, lagunares ou deltáicos. As diferentes origens geológicas do caulim resultam em diferenças notáveis na composição mineralógica” (Santos, 1975 apud LUZ et al, 2005).

Segundo Faria (2019) o caulim secundário pode ser dividido em três grupos, sendo eles: caulim sedimentar, areia caulínica e argilas plásticas.

O caulim primário pode ser diferenciado do caulim secundário devido o teor de  $TiO_2$  e de argilominerais. No caulim primário, geralmente, há um teor de 10 a 15% de argilominerais. O transporte acarreta o aumento na proporção de argilominerais e o caulim secundário alcança valores superiores a 90% destas substâncias. No caulim primário estão presentes caulinita e/ou haloisita isolados

ou em uma mistura com variáveis proporções, já o Caulim secundário é constituído predominantemente por caulinita (SANTOS, 1989).

### **3.2.2 Mineração e beneficiamento do caulim**

No caulim podem estar presentes impurezas. As principais são Óxidos de ferro e titânio, mica e feldspatos. Tais impurezas podem alterar características importantes do caulim como, alvura e cor. Impurezas em altas concentrações podem comprometer sua aplicação direta, gerando a necessidade do beneficiamento do material (RODRIGUES, 2009).

Viera (2018) relata que a aplicação do caulim definirá qual será o processo empregado para o beneficiamento do mesmo. Tal processo pode variar entre beneficiamento via seco ou via úmido.

O processo de beneficiamento a seco é mais simples, pois o caulim apresenta alvura e distribuição granulométrica adequadas, bem como baixo teor de quartzo. Nesse processo, o caulim bruto é inicialmente fragmentado abaixo de 2,54 cm (1”), em seguida é conduzido para secagem em secadores rotativos. Posteriormente o caulim seco é pulverizado em moinhos de rolos, para então ser classificado, por tamanho. O processo de classificação é denominado flotação com ar, onde as partículas mais finas são conduzidas para o topo do aeroseparador por uma corrente de ar quente, havendo assim a separação de partículas por tamanho (LUZ *et al.*, 2005).

Quanto ao beneficiamento a úmido, de acordo com Luz *et al.* (2005), o processo passa por diversas etapas, sendo essas: dispersão, desarenamento, fracionamento, separação magnética, lixiviação, filtração e secagem.

**Dispersão:** o caulim bruto é transformado em polpa através da adição de água, dispersante químico e reagentes reguladores de pH.

**Desarenamento:** visa a remoção de impurezas com granulação superior a 0,25 mm. Para tal, são utilizados tanques de sedimentação, classificadores hidráulicos ou peneiras, capazes de remover materiais como o quartzo, a mica e alguns óxidos de ferro e de titânio.

**Fracionamento:** as indústrias consumidoras exigem que o caulim fornecido apresente poucas variações em sua distribuição granulométrica. Tal

separação granulométrica é obtida utilizando-se o princípio de sedimentação, seja por ação da gravidade (tanques de sedimentação ou hidroclassificadores) ou mediante a ação de um campo centrífugo (hidrociclones ou centrífugas).

**Separação magnética:** a finalidade desta etapa é separar as partículas magnéticas (óxidos de ferro e titânio), contidas no produto do fracionamento, de modo a elevar a alvura do caulim.

**Lixiviação oxidante:** utilizada quando se deseja remover a matéria orgânica remanescente no caulim após a separação magnética.

**Lixiviação Redutora:** são utilizados agentes redutores capazes de provocar a redução do ferro presente na forma de óxidos e/ou hidróxidos férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) para  $\text{Fe}^{2+}$  (ferroso), solúvel em água, podendo ser removido em uma operação de filtração.

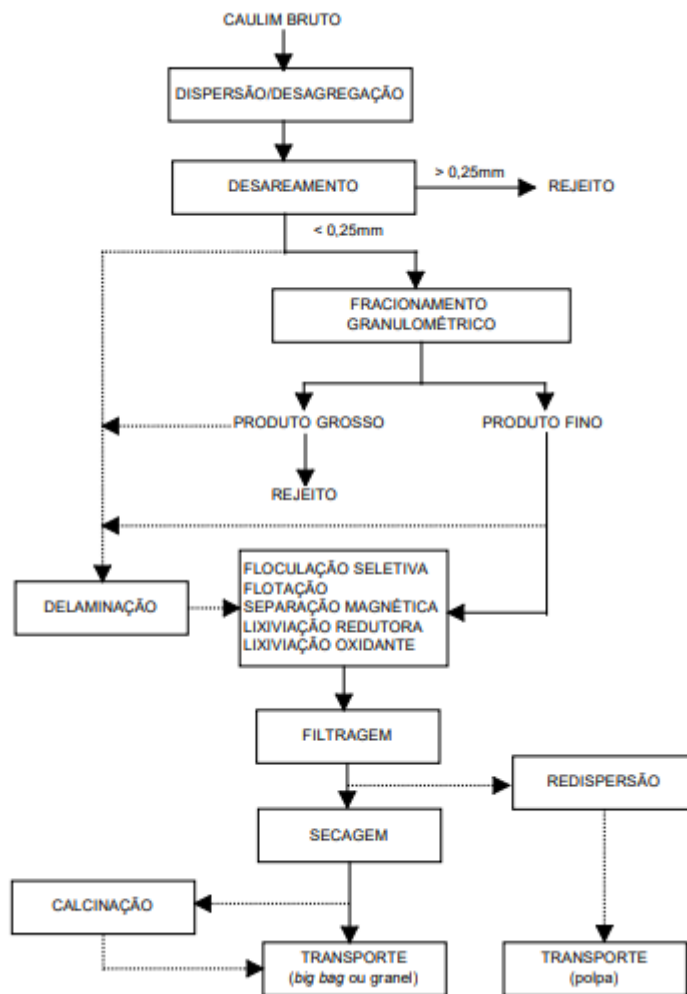
**Filtração e secagem:** após a filtração, a umidade do caulim é reduzida para valores entre 30 e 55% dependendo do equipamento utilizado e também de como será realizado o processo de secagem.

**Calcinação:** a calcinação visa obter produtos com características especiais através de um tratamento térmico no caulim, a temperaturas que variam entre 650 e 1050°C. Podem ser obtidos dois tipos de produtos, dependendo da temperatura de tratamento. Entre 650 e 700°C há a remoção quase que total de grupos de hidroxilas estruturais e água na forma de vapor, produzindo um caulim com uma melhor resistência e opacidade. O caulim de calcinação completa é obtido quando o tratamento térmico ocorre entre 1000 e 1050°C. Nessa temperatura, a caulinita é transformada em uma mistura de mulita, cristobalita e sílica-alumina. Essa transformação provoca aumentos no índice de refração, na opacidade, e principalmente na alvura do produto.

A Figura 4 esquematiza todo o processo de beneficiamento do caulim por via úmida.



Figura 4 – Diagrama simplificado do beneficiamento do caulim, via úmida.



Fonte: LUZ et al, 2005 p.239

### 3.2.3 Aplicações na indústria

#### 3.2.3.1 Papel

“Propriedades como cor branca, opacidade, área superficial grande e baixa abrasividade faz com que o caulim seja uma das matérias primas mais consumidas pela indústria de papel” (LUZ *et al*, 2005).

“Dentre os diferentes setores que se utilizam do minério, o papel possui um destaque especial, com uma participação de 45% no mercado [32% para cobertura (*coating*) e 13% para carga (*filler*)]” (FARIA, 2019).

Para a indústria de papel as argilas podem ser aplicadas de duas maneiras: como carga ou como cobertura. Para o tipo carga são necessárias as seguintes especificações: caulinita superior a 90% em massa; teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> 1%; baixo teor de quartzo (entre 1 e 2%); grau de alvura superior a 80%; 50 a 70% das partículas devem assumir diâmetros inferiores a 2 mm. Aqui ele é utilizado para diminuir a quantidade de celulose e melhorar características de impressão do papel como permeabilidade e resistência. Já o uso como cobertura possui as especificações são: caulinita entre 90 e 100%; teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0,5 e 1,8% e TiO<sub>2</sub> entre 0,4 e 1,6%; ausência de quartzo; grau de alvura superior a 85% e tamanho das partículas de 80 a 100% inferiores a 2 mm. Desta forma ele é utilizado com a finalidade de produzir um papel com uma superfície menos absorvente e rugosa, e também mais branca, brilhante, opaca e com maior receptividade à tinta. (LUZ *et al.*, 2005; FARIA, 2019).

A Tabela 1 esquematiza os parâmetros a serem avaliados e levados em consideração no que se trata a aplicação na indústria do papel.

Tabela 1 – Parâmetros para aplicação na indústria do papel como carga e cobertura.

<b>PAPEL</b>	
<b>Carga</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
<b>% caulinita</b>	≥ 90% em massa
<b>Alvura</b>	≥ 80%
<b>Granulometria</b>	50,0 – 70,0 < 2 mm
<b>Teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1%
<b>Teor de Quartzo</b>	1 – 2 %
<b>Teor de TiO<sub>2</sub></b>	1%
<b>Umidade (%)</b>	4,6 – 6,0
<b>Cobertura</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
<b>% caulinita</b>	Entre 90 e 100 %
<b>Alvura</b>	≥ 85%
<b>Granulometria</b>	80 a 100 % < 2 mm
<b>Teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,5 - 1,8 %
<b>Teor de Quartzo</b>	Ausência
<b>Teor de TiO<sub>2</sub></b>	0,4 – 1,6 %

### 3.2.3.2 Cerâmica Branca

Segundo Pereira (2008) a argila pode ser utilizada facilmente na fabricação de cerâmica, na qual, após a queima, a forma escolhida é mantida e o objeto adquire resistência térmica e mecânica.

O caulim é responsável por conferir coloração branca à massa cerâmica e é fonte de óxido de alumínio. Este por sua vez é responsável pela fase de vitrificação da peça, regulando a reação de equilíbrio. Durante a queima com temperaturas superiores a 1000°C, o caulim se converte em mulita formando fase vítrea. A mulita aumenta a resistência mecânica e reduz a deformação durante o processo de queima (LUZ *et al.*, 2005).

Segundo Santos (1989) as argilas para cerâmicas podem ser classificadas de acordo com a sua coloração de queima nas temperaturas de 950°C, 1250°C e 1450°C. Tratando-se da cerâmica branca a temperatura usual de queima com maior qualidade é de 1250°C e neste momento o material deve apresentar cor branca-rósea, cinza ou creme. A 1450°C as argilas queimam em cores claras, iguais a 1250°C, ou então vão para tonalidades mais escuras como cinza-escuro ou marrom. Tabela 2, evidencia essa classificação do uso cerâmico das argilas conforme sua cor de queima a variadas temperaturas.

Tabela 2 – Classificação preliminar de argilas para uso cerâmico com base nas cores apresentadas após queima.

Grupo cerâmico	Cores do corpo de prova			
	110 °C	950 °C	1250 °C	1450 °C
<b>Cerâmica vermelha</b>	Vermelho, marrom, verde, creme, cinza, outras cores exceto branca, vermelha-alaranjada, marrom-avermelhada, preta, cinza-avermelhada.	Vermelho com diversas tonalidades, amarela, marrom-clara.	Creme amarelada, vermelho, vermelho escura, marrom-escura, marrom-claro e preta.	Marrom-escura, preta com ou sem perda de forma, cinza-esverdeada, cinza-escura, marrom-escura, preta com fusão.
<b>Cerâmica Branca</b>	Branca, creme-clara, creme-escura, rosa-clara, rosa-escura, amarelo-clara, cinza-clara, cinza-escura, preta.	Branca, creme-clara, rosa-clara, rosa-escura, amarelo-clara.	Branca, creme-clara, creme-escura, cinza-clara, cinza-escuro, marrom, amarela.	Branca, creme-clara, cinza-clara, cinza-escura, cinza.
<b>Produtos Refratários</b>	Branca, creme-clara, cinza-clara, cinza-escura, preta.	Branca, rosa, creme clara, marrom-clara, branca-cremosa, branca-rosada.	Amarela-clara, creme, creme-clara, cinza-clara.	Branca, cinza-clara, creme-clara, cinza-escura, marrom-escura sem perda de forma.

Fonte: Adaptação SANTOS, 1989 p.180.

Segundo Tanno e Motta (2000) o caulim é utilizado na produção de louças sanitárias, louças de mesa, refratários, peças de revestimento (pisos e azulejos) e porcelana elétrica.

Uma classificação corriqueira da cerâmica branca se baseia no teor em peso de água absorvida pelo corpo cerâmico: a) porcelana 0 – 0,5% (absorção zero), b) grês 0,5 – 3% (baixa absorção) e c) louça acima de 3% (corpos mais porosos) (SOUZA ,2007).

Segundo Faria (2019), na produção de louças de mesa, é necessário que o caulim apresente baixo teor de ferro e titânio, de forma a conferir cor branca à peça, após a queima. O uso de caulim nessas peças aumenta a resistência, além de melhorar a plasticidade, na etapa de moldagem. Já os caulins utilizados para a produção de azulejos devem apresentar granulometria entre 20 e 40% menores que 2 µm, já que caulins mais finos prejudicam a resistência mecânica do produto final.

O comportamento do produto após a queima apresenta propriedades específicas e tais parâmetros são utilizados para avaliar sua possível aplicação. Estes são: retração linear de queima, absorção de água, porosidade aparente, massa específica, módulo de ruptura à flexão e compressão (SOUZA, 2007).

Segundo Dantas (2008) as argilas dos municípios São Simão (SP) e Oeiras (PI) são utilizadas como referência para a indústria de cerâmica Branca. Na Tabela 3 é possível observar as principais características das argilas desses municípios em função da temperatura a que esse material foi submetido.

Tabela 3 – Características físico-químicas e cerâmicas das argilas de São Simão (SP) e Oeiras (PI).

Parâmetros Analisados		Oeiras (PI)	São Simão
110°C	Limite de Plasticidade (%)	31,4	32,9
	Umidade de prensagem (%)	10,3	9,7
	Varição Linear após secagem (%)	-0,2	-0,8
	Tensão Ruptura à flexão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	49	32
	Cor	cinza	cinza escuro
1150°C	Perda ao fogo (%)	0	15,2
	Contração linear (%)	11,3	9,6
	Tensão Ruptura à flexão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	327	159
	Absorção de água (%)	0,4	19,4
	Porosidade aparente (%)	1	34,6
	Massa específica aparente (Kgf/m <sup>3</sup> )	2495	1787
	Cor	creme escuro	branca
1250°C	Perda ao fogo (%)	8,5	15,3
	Contração linear (%)	11	14,9
	Tensão Ruptura à flexão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	334	243
	Absorção de água (%)	0	6,9
	Porosidade aparente (%)	0	14,3
	Massa específica aparente (Kgf/m <sup>3</sup> )	2493	2255
	Cor	cinza	branca

Fonte: Adaptado de MOTTA et al 1993, p.160.

O caulim cerâmico deve possuir caulinita entre os teores de 75% a 85%, minerais que alterem sua cor, como óxidos de ferro, devem estar presente em teor menor que 0,9% de modo que a alvura do material após a queima esteja entre 85 e 92 (SOUZA, 2007).

Os parâmetros a serem levados em consideração para a avaliação da aplicação do caulim na indústria da cerâmica branca podem ser observados na Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 – Parâmetros para aplicação como Cerâmica Branca.

<b>CERÂMICA BRANCA</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
<b>%Caulinita</b>	75-85%
<b>Alvura</b>	85-92%
<b>Cor da queima a 110 °C</b>	Cinza – Cinza Escuro
<b>Cor da queima a 1150 °C</b>	Creme escuro – Branco
<b>Cor da queima a 1250 °C</b>	Cinza - Branco
<b>Granulometria</b>	20 – 40 % < 2 $\mu$ m
<b>Limite de Plasticidade (%)</b>	31,4 – 32,9
<b>Oxido de ferro</b>	< 0,9%

### **3.2.3.3 Descorante**

Segundo Silva (2005) a indústria de óleos comestíveis e de derivados do petróleo utiliza argilas como agentes descorantes de óleos vegetais e minerais.

A etapa de remoção de pigmentos utilizando materiais adsorventes pode ser denominada: branqueamento, descoramento ou clarificação. Este processo é uma das etapas de refino de óleos vegetais. O termo argila descorante pode ser utilizado para denominar argilas que, em seu estado natural ou após ativação ácida química ou térmica, possuem a capacidade de adsorver materiais corantes (pigmentos) dissolvidos no óleo (SANTOS, 1997 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2016).

As argilas utilizadas como matéria-prima para a obtenção de argilas ativadas por ácidos são argilas que, no estado natural, têm um poder descorante muito baixo, mas que desenvolvem um elevado poder descorante pelo tratamento com ácido. Essa ativação ácida aumenta a área específica e a porosidade aparente das argilas. Geralmente, esses materiais são bentonitas cálcicas, isto é, argilas essencialmente montmorilloníticas em que o cátion saturante é predominantemente o cálcio que pertencem ao grupo das argilas esmectitas (BERTELLA *et al.*, 2010).

Os requisitos para que uma argila esmectítica ativada por ácido possa ser utilizada como agente descorante são: a) área específica na faixa de 120 a 140 m<sup>2</sup>/g; b) pH entre 6,0 e 7,5; c) porosidade entre 60 e 70%; d) ausência de atividade catalítica (óleos comestíveis para evitar gostos e cheiros); e) baixa retenção de óleo na filtração; f) boa filtrabilidade ou percolação (GRIM apud COELHO *et al.*, 2007b).

Para melhor avaliação do cenário e sistematização dos parâmetros a serem avaliados a Tabela 5 apresenta os dados a serem levados em consideração para aplicação de argilas na indústria de descorantes.

Tabela 5 - Parâmetros para aplicação na indústria de descorantes.

<b>DESCORANTE</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
<b>Mineralogia</b>	Montmorilonita é o principal mineral.
<b>pH</b>	Entre 6,0 e 7,5
<b>Porosidade</b>	Entre 60 e 70%
<b>Área específica</b>	Entre 120 e 140 m <sup>2</sup> /g

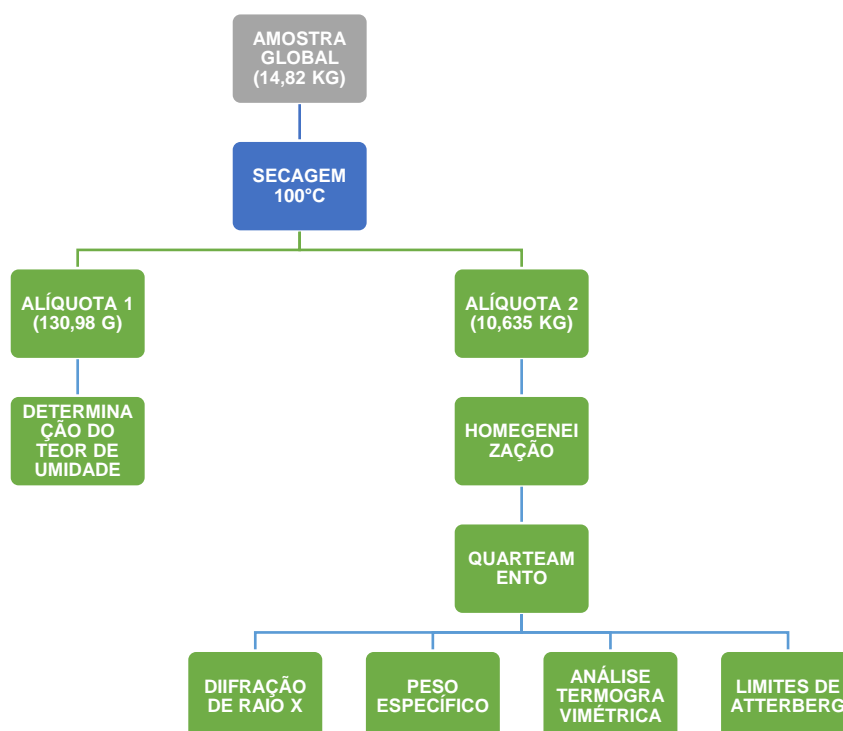
#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A argila em estudo é proveniente dos vales fluviais dos rios Mucuri e Jequitinhonha (MG) do Norte Mineiro, em específico do Município de Novo Cruzeiro. O setor nordeste corresponde a uma área de aproximadamente 7.700 Km<sup>2</sup> e é uma área com potencial para argilas cauliniticas.

A caracterização mineralógica é a base para todo e qualquer trabalho da área de tratamento de minérios. Com o intuito de compreender o seu comportamento, conhecer o material com que se trabalha, suas características, qualidades e proporções, encaminha todos os estudos e evidencia quais caminhos devem ser tomados para melhor aproveitamento de tais recursos minerais. Foram realizados diversos ensaios, afim de classificar a amostra citada e assim definir sua melhor aplicação industrial.

Os procedimentos experimentais foram desenvolvidos nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) a partir de uma amostra de argila proveniente do Norte de Minas Gerais, com massa aproximada de 15 kg (distribuída em duas alíquotas). O organograma apresentado na Figura 5 descreve a sequência da metodologia adotada.

Figura 5 – Organograma da metodologia.





#### **4.1 Umidade**

Em função da amostra inicial apresentar-se com umidade aparentemente elevada, optou-se por aferir a massa inicial (intitulada massa úmida) e compará-la com a massa da amostra após a secagem (intitulada massa seca).

A etapa de secagem foi realizada à temperatura de 100°C (+- 5°C) durante 14 horas. Optou-se por essa metodologia para tornar o material seco para os trabalhos seguintes, facilitar a desagregação e, também, para observar qual era a umidade natural da amostra em porcentagem.

#### **4.2 Quarteamento**

Após a secagem o material foi desagregado, homogeneizado por pilha cônica e pilha alongada. A divisão desta última pilha citada gerou duas alíquotas representativas da amostra inicial. Os quarteamentos posteriores foram realizados no quarteador tipo Jones, visando obter alíquotas adequadas para os ensaios subsequentes.

#### **4.3 Análise granulométrica**

Nessa etapa, foi realizado o peneiramento a úmido segundo a série Tyler nas peneiras de 300 a 38  $\mu\text{m}$  no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP). A fração inferior a 38 $\mu\text{m}$  foi analisada no granulômetro a laser Cilas 1064 do Laboratório de Propriedades Interfaciais do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP). O procedimento utilizou uma solução dispersante 0,1 % (p/v) de metassilicato de sódio.

#### **4.4 Análise mineralógica**

Utilizou-se a técnica de difração de raios X para determinar a composição mineralógica da amostra. O difratômetro utilizado foi o *PANalyticalX'Pert<sup>3</sup> Powder* e o teste foi realizado no Laboratório de Microscopia Ótica e Difractometria de Raio X do Departamento Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP).

Aplicou-se o método do pó total com radiação  $K\alpha$  do cobre (1,5419 Å) e ângulo de varredura variando de 5° a 90° para obtenção do difratograma.

#### 4.5 Análise termogravimétrica

Para a análise termogravimétrica foi utilizado o equipamento TA Q50 da marca TA *Instruments* e os testes foram realizados no Laboratório de Espectroscopia no Infravermelho e Análise Termogravimétrica do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP). Os parâmetros utilizados foram: tempo de análise: 95 minutos (1h35min); temperatura inicial (de equilíbrio): 50,00 °C; rampa de aquecimento: 10,00 °C/min até 1000,00 °C

#### 4.6 Peso específico

Uma das técnicas para medir a densidade relativa dos sólidos é a picnometria. Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar (SAMPAIO e SILVA, 2007).

Os passos necessários foram:

- a) Aferir a massa do picnômetro vazio, previamente limpo e seco;
- b) Aferir a massa do picnômetro somente com amostra;
- c) Aferir a massa do picnômetro com amostra e água;
- d) Aferir a massa do picnômetro com água;

Segundo Sampaio e Silva (2007), é necessária uma balança com no mínimo duas casas decimais de precisão. Feito isso, os valores obtidos nas pesagens foram aplicados na Equação 1:

$$ds = \frac{(A_2) \cdot (A_1)}{(A_4 + A_2) \cdot (A_1 + A_3)} \quad (1)$$

Onde:

ds: densidade dos sólidos;

A<sub>1</sub>: massa do picnômetro vazio;

A<sub>2</sub>: massa do picnômetro + amostra;

A<sub>3</sub>: massa do picnômetro + amostra + água;

A<sub>4</sub>: massa do picnômetro + água.

#### 4.8 Limites de Atterberg

Dantas (2008) descreve que o limite de liquidez representa a quantidade de água em uma determinada substância no estado de transição do líquido para o plástico e o limite de plasticidade é quando essa substância perde a plasticidade. A diferença entre esses dois limites gera o índice de plasticidade que é um fator determinante de qualidade para a aplicação industrial das argilas. Sendo a Equação 2 representado por:

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

onde:

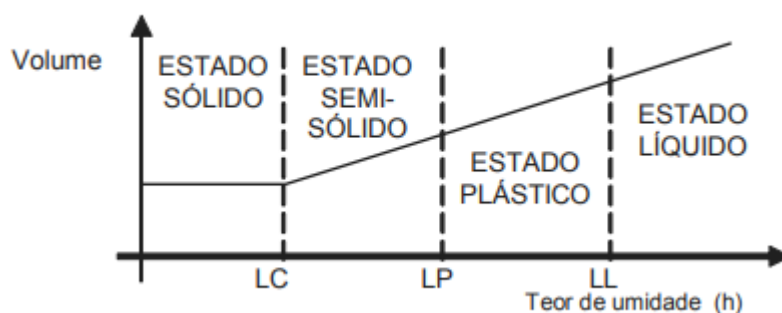
IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

A Figura 6, segundo Almeida (2005), apresenta esses estados físicos, definidos como estados físicos de consistência e suas fronteiras.

Figura 6 – Estados de consistência.



Fonte: Almeida (2005) p.95.

Segundo Jenkins *apud* Caputo (1988), os solos poderão ser classificados em:

- Fracamente plásticos: quando o índice de plasticidade assume valores entre 1 e 7% ( $1 < IP < 7$ );
- Medianamente plásticos: quando o índice de plasticidade assume valores entre 7 e 15% ( $7 < IP < 15$ );
- Altamente plásticos: quando o índice de plasticidade assume valores superiores a 15% ( $IP > 15$ ).

Os ensaios foram realizados conforme a metodologia apontada pelas normas ABNT NBR 7180/84 e NBR 6459/84 no Laboratório de Resíduos Minerais do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do procedimento proposto na seção apresentada anteriormente, foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

### 5.2 Umidade

Após a mistura das amostras de dois sacos disponibilizados do material, foi realizado o teste de umidade e o resultado obtido foi de 28,07% de umidade. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise da umidade da amostra geral.

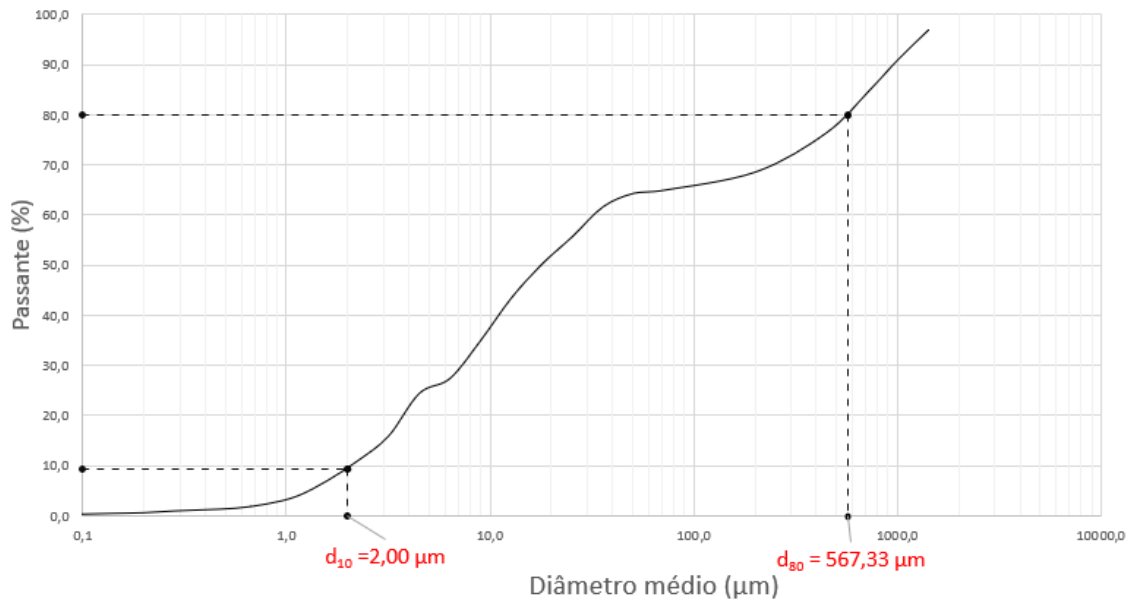
	<b>Massa úmida</b>	<b>Massa Seca</b>	<b>Teor de Umidade</b>
<b>Amostra Global</b>	14,82 kg	10,66 Kg	28,07 %

Pode-se observar que para as aplicações de descorante, como cobertura no papel e cerâmica não possuem limitações acerca da umidade. Porém para aplicação como carga no papel a umidade está bem acima do valor adequado de 6%, indicando a necessidade de processos posteriores de secagem.

### 5.3 Análise granulométrica

Os dados obtidos a partir da análise granulométrica combinada entre peneiramento e granulômetro a laser são apresentados na Figura 7. Observa-se que o  $d_{80}$  igual a 567,33  $\mu m$ , granulação na qual 80% do material analisado é passante.

Figura 7 – Análise granulométrica da argila em estudo.



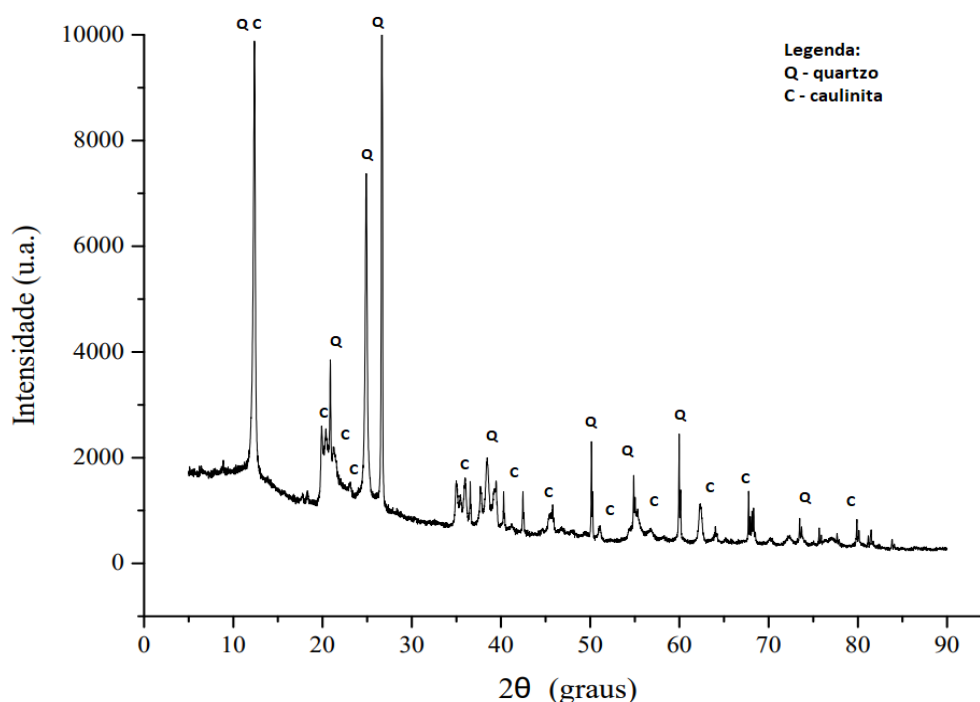
Constatou-se que 100% das partículas são menores que 2mm (2000 µm), esse resultado implica na possível aplicação desta argila na indústria do papel como cobertura. As argilas geralmente aplicadas em papel como carga possuem em média de 50% a 70% de partículas menores que 2mm, indicando que para esse uso seria necessária uma blendagem deste material com outro que possua granulação mais grossa.

Ainda nesta análise foi possível observar que aproximadamente 10% das partículas são menos que 2µm, fato este que inviabiliza a aplicação desta na indústria de cerâmica branca (de 20 a 40%). Para a utilização como descortante não foi obtida nenhuma pré definição de características granulométricas.

#### 5.4 Análise mineralógica

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos utilizando a técnica de difratometria de raios X juntamente com a semi-quantificação no *Software HighScore Plus*. A composição mineralógica da amostra analisada é 78% de caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) e 22% de quartzo ( $SiO_2$ ).

Figura 8 – Difratoograma de raio X da argila em estudo.



Devido à sua coloração clara e à quantidade de caulinita presente na amostra pode-se classificar este material, sob o ponto de vista mineralógico, como um caulim. A partir da análise deste teste é possível descartar o uso deste material como descorante, já que é usual para tal aplicação materiais do grupo da esmectita com o mineral montmorolinita predominante. Diante deste fato optou-se pela não execução de testes posteriores relacionados a aplicação industrial como descorante.

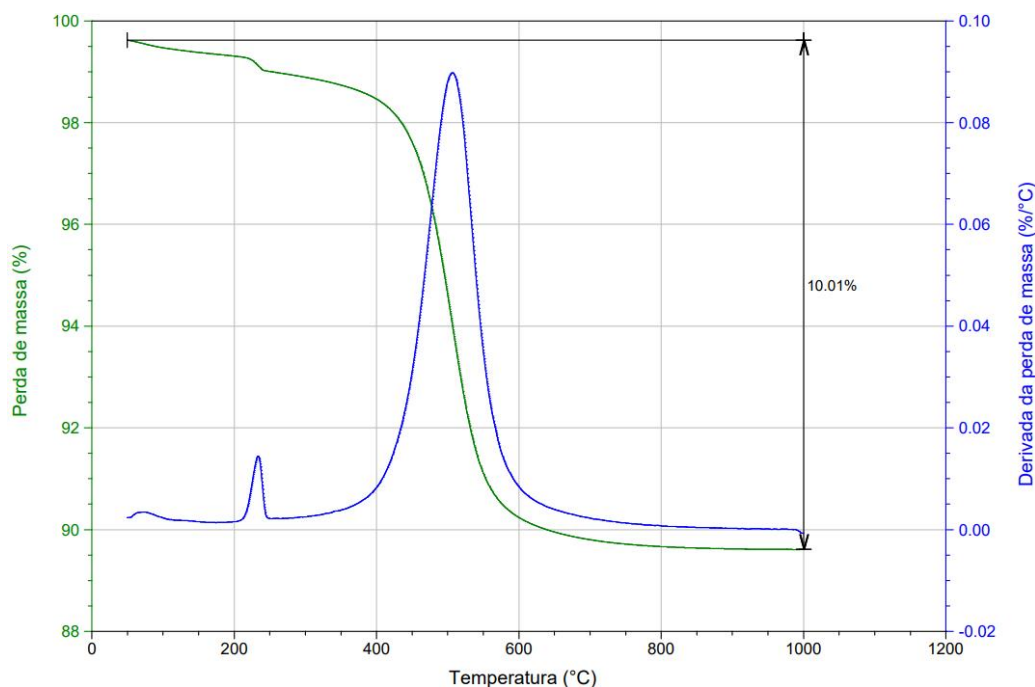
O teste mineralógico ainda descarta o uso cobertura para papel já que para essa aplicação é necessária ausência de quartzo. E para o uso de papel como carga, a porcentagem de caulinita deveria ser superior a 90% e de quartzo entre 1% e 2%. Isto indica que para tal aplicação seria necessário processos posteriores de concentração estagiada, salientando a importância de estar atento à porcentagem de quartzo a ser obtida. Para a aplicação na indústria da cerâmica branca o material se adequa, pois possui porcentagem de caulinita entre 75% e 85%.

### 5.5 Análise termogravimétrica

Quando as argilas são submetidas a diferentes temperaturas ocorre diferentes comportamentos influenciados pela sua composição e estruturação. Em 250 °C

há um pequeno pico que poderá ser correspondente ao desprendimento de água coordenada aos cátions (GONÇALVES *et al.*, 2014). Entre 400 e 600°C, há perda de massa de 8,2% devido ao processo de desidroxilação da caulinita e conseqüentemente a remoção da água estrutural (BROWN e GALLAGHER, 2003). A perda de massa total da análise foi de 10,01%. A Figura 9 apresenta a curva termogravimétrica para a amostra de argila estudada.

Figura 9 – Análise termogravimétrica da amostra de argila.



Apesar de não serem concluídas a partir do gráfico da termogravimetria algumas outras transformações térmicas ocorrem nesse material. Entre 50 e 250 °C observa-se que possivelmente há uma perda de massa relacionada a água livre naturalmente distribuída em minerais argilosos (BROWN e GALLAGHER, 2003). Segundo Földvári (2011) em 573 °C ocorre a transformação do quartzo alfa em beta, tendo como consequência a expansão, porém, variações de mais de 50 °C dessa temperatura são normalmente observadas e atribuídas à gênese ou origem, forma e temperatura de formação dos cristais (LŘNVIK e SMYKATZ-KLOSS, 1984). Neste estudo a temperatura encontrada para esse pico é de aproximadamente 510°C. Entre 600 e 1000 °C segundo Földvári (2011) ocorre o processo de recristalização da caulinita em mulita.



## 5.6 Peso específico

A partir dos dados obtidos através dos ensaios de picnometria (Tabela 7), a densidade relativa foi calculada, obtendo-se o valor equivalente a 2,45 g/cm<sup>3</sup>. Os valores das densidades teóricas dos minerais presentes na amostra são: quartzo (2,65 g/cm<sup>3</sup>), caulinita (2,6 g/cm<sup>3</sup>) e gibbsita (2,3 g/cm<sup>3</sup>). Salientando que a porcentagem de gibbsita é irrelevante, o esperado seria uma densidade entre os valores de quartzo e caulinita, portanto o valor obtido é passível de erro, visto que a metodologia utilizada foi totalmente manual erros podem ser vinculados a precisão da balança, bolhas no picnômetro, correta leitura do menisco, entre outros erros humanos. O ideal para tal situação seria refazer o experimento utilizando o picnômetro a gás Hélio, mas em virtude ao cenário pandêmico, tal análise não foi possível.

Tabela 7 – Valores do peso específico da argila obtidos pelo ensaio de picnometria.

<b>Ensaio de Pictometria</b>			
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
<b>A1</b>	25,67	25,49	28,91
<b>A2</b>	39,64	39,45	37,26
<b>A3</b>	61,91	62,46	59,77
<b>A4</b>	53,6	54,21	54,86
<b>ds</b>	2,47	2,44	2,43
		<b>ds médio</b>	2,45 g/cm <sup>3</sup>

Para todas as aplicações industriais estudadas neste trabalho não foram encontrados valores limitadores para o peso específico, portanto este material, segundo este parâmetro, pode ser aplicado em qualquer uma destas.

## 5.7 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram obtidos através dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites de Atterberg.

<b>Limites de Atterberg</b>	
<b>Limite de liquidez (%)</b>	53,57
<b>Limite de plasticidade (%)</b>	40,97
<b>Índice de plasticidade (%)</b>	12,60

Este material por possuir o índice de plasticidade (IP) de 12,60%, que está entre os valores de referência de 7% e 15 %, pode ser classificado como medianamente plástico.

Segundo Motta *et al.* (1993) as argilas brasileiras, de Oeiras e São Simão, utilizadas como referência no estudo para aplicação industrial como cerâmica branca possuem o limite de plasticidade entre 31,4 e 32,9%. O material analisado possui limite de plasticidade de 40,97% que está acima destes valores. Possivelmente, para aplicação da argila em questão na indústria de cerâmica branca, seria necessária a incorporação de agentes estruturantes (quartzo, por exemplo). Para as outras aplicações não foram encontradas dados no que se trata de plasticidade.

## 6 CONCLUSÕES

Com base na caracterização de uma argila proveniente do norte do estado de Minas Gerais, foi possível apontar as seguintes conclusões:

- A umidade da amostra da argila equivale a 28,07%, indicando a necessidade de processos iniciais de secagem para o seu uso como cobertura para papel.
- A caracterização mineralógica apontou caulinita (78%) e quartzo (22%) como minerais majoritários, classificando esse material como caulim, sob a perspectiva mineralógica. A argila em questão não se aplica às indústrias do papel (tanto para finalidade de cobertura, quanto como carga). Tratando-se dos descorantes, tal composição mineralógica também não atende aos requisitos do setor. Porém para a indústria de cerâmica branca, o material se enquadra dentro do intervalo de porcentagens de caulinita indicando a sua possível aplicação.
- A análise termogravimétrica indica uma perda de massa de 10,01% com aquecimento até 1000°C. Os picos apresentados pela curva termogravimétrica então em consonância com o DRX.
- A análise granulométrica evidencia que aproximadamente 10% das partículas são inferiores a 2 µm e 100% das partículas são menores que 2 mm. A aplicação mais próxima para tal granulometria é como cobertura para papel. Vale salientar que essa amostra não foi utilizada para estudo de aplicação na indústria de cerâmica vermelha devido a sua coloração clara, indicando que este material poderia ter finalidades mais nobres. Para cerâmica branca não se encaixa nos limites de utilização.
- Este material por possuir o Índice de plasticidade (IP) de 12,60%, que está entre os valores de referência de 7% e 15 % e pode ser classificado como medianamente plástico. O limite de liquidez encontrado foi de 53,57% e o limite de plasticidade foi de 40,97%. O limite de plasticidade está um pouco acima dos valores de referência das argilas brasileiras, o que não impede a aplicação da mesma para a indústria de cerâmica branca.

- Ao final da avaliação esta argila não é indicada para o uso nas indústrias de descorante e cobertura para papel, devido a sua mineralogia. Ela poderá ser utilizada na indústria de cerâmica branca desde que ocorra uma prévia etapa de classificação e a incorporação de materiais estruturantes, para que o limite de plasticidade esteja próximo os valores usuais brasileiros. Para validar a aplicação da argila no setor de cerâmica branca, seriam necessários mais testes, como por exemplo o teste de cor de queima.
- Já a aplicação na indústria de papel como carga este material é indicado, desde que o material seja seco, para obter umidade dentro do intervalo pré estabelecido e enriquecido estagiadamente, para obtenção de uma porcentagem de caulinita e quartzo dentro os valores esperados. Para afirmação concreta deste uso seriam necessários mais testes específicos como alvura, brancura e amarelamento, porém os mesmos não foram possíveis de serem realizados devido ao atual contexto pandêmico.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. Caracterização Física e Classificação dos Solos. **Apotila de Solos**, p. 95, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez**, 1984, 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade**, 1984, 3p.

BALDUINO, Ana Paula Zenóbia. **Estudo da Caracterização e composição de argilas de uso cosmético**. Orientador: Giovanni Cavichioli Petrucelli. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Ciências Aplicadas a Saúde) - [S. l.], 2016.

BERTELLA, F; SCHWANKE, A.J; WITTEE LOPES, C.W; PENHA, F.G. Estudo da Ativação Ácida de uma Argila Bentonita. **Erechim Perspectiva**, [s. l.], set. 2010.

BRITO, I.P.; ALMEIDA, E.P.; NEVES, G.A.; MENEZES, R.R.; SILVA, V.J.; SANTANA, L.N.L. Avaliação de novos depósitos do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica** **61**, [S. l.], p. 391-398, 2015.

BROWN, M. E.; GALLAGHER, P. K. (Ed.). **Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Applications to inorganic and miscellaneous materials**. Elsevier, 2003.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos**. v.1, 6.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

CARMO, André Luiz Vilaça do. **Avaliação da Influência dos Cátions Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na desativação de Ca, Mg Bentonitas**. Orientador: Rômulo Simões Angélica. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Geologia e Geoquímica) - [S. l.], 2015.

COELHO, Antônio C. Vieira; SANTOS, Pérsio de Souza; SANTOS, Helena de Souza. Argilas Especiais: O que são, caracterização e propriedades. **Química Nova Vol 30**, [s. l.], ed. 1, p. 146-152, 30 ago. 2007a.

COELHO, Antônio Carlos Vieira; SANTOS, Pérsio de Souza. SANTOS, Helena de Souza Argilas Especiais: Argilas Quimicamente Modificadas - Uma Revisão. **Química Nova**, [S. l.], p. 1282-1294, 2007b.

CRISCUOLO, Paulo Sérgio Rueda. **Beneficiamento do Caulim duro das bacias dos rios Capim e Jari através do processo de segregação seletiva**. Orientador: Armando Correia de Araújo. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica) - 2008.

DANTAS, Antônio de Pádua Arlindo. **Utilização de Resíduos de Rochas Ornamentais na Produção de Cerâmica Branca**. Orientador: Wilson Acchar. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) - [S. l.], 2008.

- FARIA, Rodrigo Alchaar. **Beneficiamento e Caracterização do Caulim da região de Prado (BA)**. Orientador: Helena Polivanov. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - [S. l.], 2019.
- FIGUEIREDO, Gilvan Pereira. **Propriedades físico-químicas de argilas e de zeólitas do estado do Maranhão**. Orientador: José Wilson da Silva. 2010. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Química) - [S. l.], 2010.
- FÖLDVÁRI, M. **Handbook of Thermogravimetric System of Minerals and its Use in Geological Practice**. Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary, v. 213. 180p. Hungria, 2011.
- GONÇALVES, W. P., SILVA, V. J., GOMES, J., MENEZES, R. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C., SANTANA, L. N. L. **Evaluation of the effect of different heat treatments on the smectite phases transformation**. Cerâmica, v. 60, n. 355, p. 316-322, 2014.
- LŔNVIK, K., SMYKATZ-KLOSS, W. **Comparative studies of structural transformations of carbonate and silica minerals by means of thermosonimetry and differential thermal analysis**. — *Thermochimica Acta* 72 (1–2), pp. 159–163, 1984.
- LUCAS, Eduardo Felipe Alves; CARANASSIOS, Adriano; BORLINI, Mônica Castoldi. Estudos preliminares de caracterização da argila do vale do Mulembá - ES. **XV Jornada de Iniciação Científica - CETEM**, [s. l.], 2007.
- LUZ, Adão Benvindo; CAMPOS, Antônio Rodrigues; CARVALHO, Eduardo Augusto; BERTOLINO, Luis Carlos. Caulim. *In*: LUZ, Antônio Benvindo; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais: Uso e especificações**. Rio de Janeiro - CETEM/MCT: [s. n.], 2005.
- MOTTA, José F.M; TANNO, Luiz C; JÚNIOR, Marsis Cabral. Argilas Plásticas para cerâmica Branca no Estado de São Paulo: Potencialidade Geológica. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], jun. 1993.
- MOTTA, José Francisco Marciano; LUZ, Adão Benvindo da; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; BEZERRA, Marcelo Soares; JUNIOR, Marsis Cabral; COELHO, José Mario. Argula Plástica para Cerâmica Branca. *In*: ROCHAS e Minerais Industriais. 2. ed. [S. l.]: CETEM, 2008.
- OLIVEIRA, Adalberto Luiz Rodrigues de; OLIVEIRA, Tiago Tadeu Amaral; OLIVEIRA, Victor T.A.; AMARAL, Darlene Lopes do. Reaproveitamento de Argilas Esmeclitas Impregnadas com Óleo Vegetal na produção de Blocos Cerâmicos. **60º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, [s. l.], maio 2016.
- PEREIRA, Kleberson Ricardo de Oliveira. **Estudo, em escala de laboratório, do uso de argilas do tipo BOFE na obtenção de argilas organofílicas ativadas**. Orientador: Francisco Rolando Valenzuela Diaz. Dissertação de Doutorado (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - [S. l.], 2008.
- RODRIGUES, Otávia Martins Silva. **Estudos de Flotação da Caulinita**. Orientador: Armando Corrêa Araújo. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - [S. l.], 2009.

SABEDOT, Sidney; PETTER, Carlos Otávio; CORREIA, Aline Gamba. Procedimentos para a caracterização de Caulins por expectro-colorimetria. **ENTMME**, [s. l.], v. 1, 1998. Disponível em: [https://www.artigos.entmme.org/download/1998/volume\\_1/903%20-%20Sydney%20Sabedot\\_Carlos%20Ot%C3%A1vio%20Petter\\_Aline%20Gamba%20Correia%20%20-%20PROCEDIMENTOS%20PARA%20A%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20CAULINS%20POR%20ESPECTRO%20COLORIMETRIA.pdf](https://www.artigos.entmme.org/download/1998/volume_1/903%20-%20Sydney%20Sabedot_Carlos%20Ot%C3%A1vio%20Petter_Aline%20Gamba%20Correia%20%20-%20PROCEDIMENTOS%20PARA%20A%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20CAULINS%20POR%20ESPECTRO%20COLORIMETRIA.pdf). Acesso em: 15 jul. 2020.

SAMPAIO, João Alves; SILVA, Fernanda Arruda Nogueira Gomes da. Determinação das Densidades de Sólidos e de Polpa. *In: Tratamento de Minérios - Práticas Laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 37-51.

SANTOS, Pérsio de Souza. **Ciência e Tecnologia das Argilas**. 2. ed. rev. e aum. [S. l.: s. n.], 1989. v. 1.

SENNA, Juliano Alves. **Caracterização de argilas de utilização na indústria cerâmica por espectropia de reflectância**. Orientador: Carlos Roberto de Souza Filho. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Geociências) - [S. l.], 2003.

SILVA, Adriana Almeida. **Estudo de argilas organofílicas destinadas à separação óleo/água**. Orientador: Meiry Gláucia F. Rodrigues. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Química) - [S. l.], 2005.

SILVA, Laura Abreu da. **Desenvolvimento do Processo de Obtenção da Bentonita Organofílica de Moçambique: Síntese e Caracterização**. Orientador: Nivaldo Cabral Kuhnen. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Química) - [S. l.], 2010.

SILVA, Sebastião Pereira. Caulim. **Balanco Mineral Brasileiro**, [s. l.], p. 121-133, 2001. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/balanco-mineral-brasileiro-2001>. Acesso em: 15 jul. 2020.

SOUZA, Laura Lopes de. **Aproveitamento de Resíduo de Caulim em Cerâmica Branca**. Orientador: Wilson Acchar. Dissertação de Mestrado (Graduação em Engenharia Mecânica) - 2007.

TANNO, Luiz Carlos; MOTTA José Francisco Marciano. Panorama Setorial – Minerais Industriais. **Cerâmica Industrial**, n 5, p.37-40 – 2000.

TEIXEIRA-NETO, Érico; TEIXEIRA-NETO, Ângela Albuquerque. Modificação Química de Argilas: Desafios e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. **Química Nova**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 809-817, 2009.

VARELA, James José; GLIESE, Roberto; PETTER, Carlos Otávio; PEIXOTO, Carlos Arthur. Controle de qualidade no processamento de polpas de caulim utilizando propriedades óticas. **Revista Escola de Minas**, [s. l.], p. 201-206, 2005.

VIEIRA, Ana Beatriz da Silva. **Avaliação do rendimento de processos utilizados para o beneficiamento do resíduo industrial Caulim**. Orientador:

Heber Sivini Ferreira. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - 2018.



## APÊNDICE A - Colorimetria

“A colorimetria é uma técnica aplicável em diversos ramos das atividades industriais, onde a cor tem importância para a produtividade das empresas”. A Alvura é um parâmetro colorimétrico indispensável para o aproveitamento econômico das argilas na indústria do papel (SABEDOT *et al.*, 1998).

Segundo Criscuolo (2008) a quantificação das cores é baseada na forma pela qual o olho humano as reconhece, ou seja, através de 3 componentes (vermelho, verde e azul), que são chamados de valores tristímulus (ou tri-estímulos).

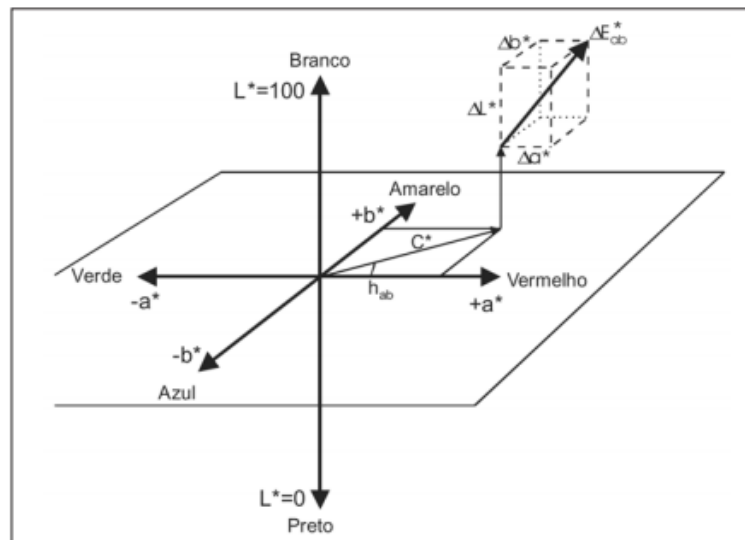
Segundo Varela *et al.* (2005) e Criscuolo (2008) o sistema colorimétrico mais amplamente utilizado e recomendado pelo CIE (*International Commission on Illumination*) é o espaço uniforme CIELAB 1976 (CIE L\*a\*b). Este sistema é representado por 3 coordenadas (L\*, a\* e b\*) obtidas por transformações matemáticas dos valores tristímulus X, Y e Z, onde:

L\* = representa o nível de luminosidade da amostra, sendo que o seu valor varia de 0 para totalmente negro e 100 para totalmente branco.

a\* = representa o nível de verde e de vermelho da amostra, no qual valores positivos indicam que a amostra está avermelhada, e negativos que está esverdeada.

b\* = representa o nível de azul e amarelo da amostra, no qual valores positivos indicam que a amostra está amarelada, e negativos que está azulada. A Figura 5 apresenta o sistema colorimétrico CIE L\*a\*b\*.

Figura A1– Representação do sistema colorimétrico CIE L\*a\*b\*.



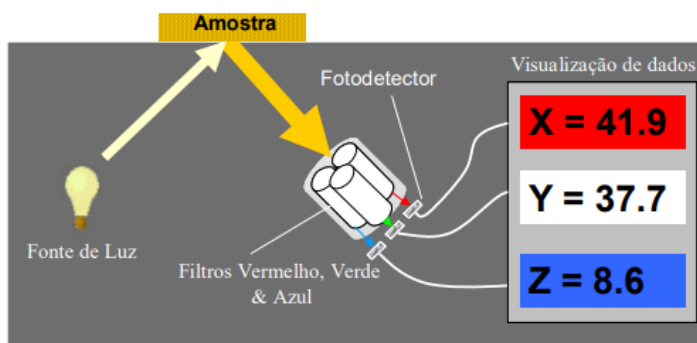
Fonte: VARELA et al, 2005 p.203.

As diferenças de cor  $\Delta E$  (DE) para esse sistema são calculadas a partir das diferenças dos valores Lab\* entre amostras, utilizando-se a Equação 3:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (3)$$

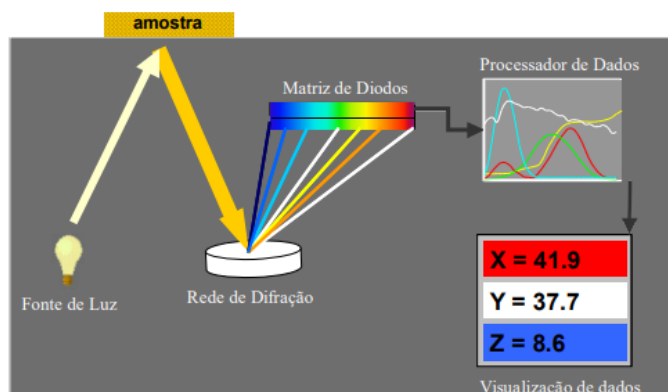
Segundo Crisculo (2008) os colorímetros utilizam uma fonte de luz para iluminar a amostra a ser medida. A luz refletida pelo objeto passa através de filtros (vermelho, verde e azul) para simular as funções do observador. Um fotodetector localizado na saída de cada filtro detecta a quantidade de luz que passa através dos filtros. Os sinais saem como valores X, Y e Z. Já os espectrômetros usam uma fonte de luz para iluminar a amostra a ser medida. A luz refletida ou transmitida pelo objeto passa por uma rede de difração que a separa em um espectro. O espectro cai em uma matriz de diodos que mede a luz a cada comprimento de onda. Os dados espectrais são enviados a um processador no qual são multiplicados com os valores tabelados para o iluminante CIE e o observador obtém os valores X, Y, Z. As Figuras 6 e 7 ilustram como é o funcionamento dos colorímetros e dos espectrômetros.

Figura A2 – Esquema do cálculo dos valores tristímulus em um colorímetro.



Fonte: CRISCUOLO, 2008 p.29.

Figura A3 – Esquema do cálculo dos valores tristímulus em um espectrofotômetro.



Fonte: CRISCUOLO, 2008 p.30.

Segundo Criscuolo (2008) a alvura utilizada na indústria do papel é a reflectância da luz azul, esta ignora as partes amarelas e vermelhas e leva em consideração apenas o espectro azul. A alvura ISO é definida como a reflectância da luz azul correspondente à distribuição espectral com um comprimento de onda específico de 457 nm para uma superfície perfeitamente difusa. Para colorímetros existe um filtro específico de 457 nm e em espectrômetros a alvura é calculada no intervalo de 400 a 500 nm. A fórmula de cálculo da alvura é demonstrada na Equação 4:

$$Alvura = \frac{\sum R(\lambda)F(\lambda)}{\sum F(\lambda)} \quad (4)$$

Onde:

$R(\lambda)$  = Valores de reflectância entre 400 e 500 nm

$F(\lambda)$  = Função Tappi entre 400 e 500 nm