



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

PAULO GILDÂNIO FERREIRA TEIXEIRA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ARGILAS UTILIZADAS POR DUAS
EMPRESAS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS NO MUNICÍPIO DE
CRATEÚS – CE**

CRATEÚS

2021

PAULO GILDÂNIO FERREIRA TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ARGILAS UTILIZADAS POR DUAS
EMPRESAS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS NO MUNICÍPIO DE CRATEÚS –
CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
da Universidade Federal do Ceará - Campus
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Me. Tiany Guedes
Cota

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Dio-
nes Oliveira Silva

CRATEÚS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T268c Teixeira, Paulo Gildânio Ferreira.
Caracterização tecnológica de argilas utilizadas por duas empresas na produção de peças cerâmicas no município de Crateús – CE / Paulo Gildânio Ferreira Teixeira. – 2021.
79 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2021.

Orientação: Profa. Ma. Tiany Guedes Cota.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.

1. Caracterização Tecnológica. 2. Argila. 3. Peças Cerâmicas. I. Título.

CDD 622

PAULO GILDÂNIO FERREIRA TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ARGILAS UTILIZADAS POR DUAS
EMPRESAS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS NO MUNICÍPIO DE CRATEÚS –
CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
da Universidade Federal do Ceará - Campus
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Tiany Guedes Cota (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira
Silva (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Débora Nogueira Lopes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Tamiris Fonseca de Souza
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

À Deus

À minha mãe Maria Ferreira, meu irmão Paulo
Gildário, meu pai Paulo Geovane, minha tia Ma-
ria Aparecida e minha namorada Míria Sousa
porque sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

À minha Mãe e ao meu Pai, pelo apoio e por proporcionarem a oportunidade de estudar. Ao meu Irmão, por todo incentivo e ajuda. Em especial a minha Mãe, por me fazer entender, desde cedo, a importância dos livros.

Aos meus orientadores, Professora Tiany Guedes Cota e Professor Francisco Diones Oliveira, pelas horas dedicadas a esse trabalho e por todas as críticas e elogios.

Agradeço a todos os professores por todo empenho, dedicação e vontade de transmitir o seu conhecimento. Em especial aos professores Sebastião Rodrigo Cortez, Sandro Vagner Lima, Rafael Chagas, Kennedy Ramos e Carlos Eduardo.

Agradeço a Andreza Rafaela Morais Pereira, Engenheira de Minas responsável pelo Laboratório de Geologia da Universidade Federal do Ceará em Crateús, por toda ajuda na preparação e realização dos ensaios físicos.

Em especial aos componentes da banca avaliadora Débora Nogueira e Tamiris Fonseca pela leitura do trabalho, pelas sugestões e recomendações.

“Em algum lugar, algo incrível está esperando
para ser descoberto.”

(Carl Edward Sagan)

RESUMO

O Brasil possui um grande número de depósitos aluvionares de argila por toda a extensão do seu território. Contudo, parte considerável não é submetida a estudos detalhados de caracterização tecnológica, acarretando em problemas nas fases de extração e confecção das peças cerâmicas. No município de Crateús no Ceará, apesar da existência de empresas do ramo, não existem trabalhos relacionados a caracterização do material argiloso usado na confecção das peças cerâmicas. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva realizar a caracterização tecnológica, da argila utilizada por duas empresas. Para tal foram realizados ensaios de umidade, massa específica, limites de Atterberg, análise granulométrica e difratometria de raios X. Os resultados da caracterização física se mostraram adequados para materiais argilosos e os principais minerais identificados por meio da difratometria de raios X foram: quartzo; albita; ortoclásio; muscovita; illita; caulinita; vermiculita e montmorilonita.

Palavras-chave: Caracterização Tecnológica. Argila. Peças Cerâmicas.

ABSTRACT

Brazil has a large number of alluvial clay deposits throughout its territory. However, the defined part is not submitted to detailed studies of technological characterization, resulting in problems in the extraction and confection phases of ceramic pieces. In the municipality of Crateús in Ceará, despite the existence of companies in the sector, there are no studies related to the characterization of the clay material used in the manufacture of ceramic pieces. In this sense, the present work aims to carry out a technological characterization of the clay used by two companies. For this purpose moisture, specific mass, Atterberg limits, particle size analysis and X-ray diffractometry were carried out. The results of the physical characterization of the basic medium for clayey materials and the main minerals determined by X-ray diffraction were: quartz; albite; orthoclase; muscovite; illite; kaolinite; vermiculite and montmorillonite.

Keywords: Technological Characterization. Clay. Ceramic Parts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Localização de Crateús	17
Figura 2 – Horizontes do solo e características dos solos de clima seco	18
Figura 3 – Distribuição dos tipos de solos no município de Crateús	19
Figura 4 – Rede hidrográfica do Município de Crateús	20
Figura 5 – Classificação das argilas quanto a sua origem	22
Figura 6 – Classificação dos argilominerais quanto às características cristalinas	24
Figura 7 – - Intervalo de comprimentos de onda para radiação X	25
Figura 8 – - Exemplo de tubo de raios X	26
Figura 9 – - Esquema simplificado de um difratômetro de raios X	28
Figura 10 – - Frações do solo estabelecidas pela ABNT	31
Figura 11 – Teores de umidade e estados do material	32
Figura 12 – Província Borborema e subdivisões	34
Figura 13 – Unidades Litoestatigráficas	37
Figura 14 – Resumo da metodologia aplicada	39
Figura 15 – Mapa de localização para os pontos de amostragem	40
Figura 16 – Aparelho de Casagrande	41
Figura 17 – Destorroamento das argilas	43
Figura 18 – Quarteamento das amostras de argilas	44
Figura 19 – Amostra preparada para o ensaio de Limite de Plasticidade	46
Figura 20 – Amostra preparada para o ensaio de Limite de Liquidez	47
Figura 21 – Características da argila no ponto 1	48
Figura 22 – Amostragem da argila no ponto 2	49
Figura 23 – Características da argila do ponto 3	49
Figura 24 – Características da argila amostrada no ponto 4 (Pilha e furo)	50
Figura 25 – Características da argila coletada no ponto 5	51
Figura 26 – Argila coletada no ponto 6	51
Figura 27 – Determinação do limite de liquidez para amostra A1	62
Figura 28 – Determinação do limite de liquidez para amostra A3	63
Figura 29 – Determinação do limite de liquidez para amostra A4.1	64
Figura 30 – Determinação do limite de liquidez para amostra A4.2	65
Figura 31 – Determinação do limite de liquidez para amostra A5	66

Figura 32 – Determinação do limite de liquidez para amostra A6	67
Figura 33 – Curva de análise granulométrica para a amostra A1	70
Figura 34 – Curva de análise granulométrica para a amostra A2	70
Figura 35 – Curva de análise granulométrica para a amostra A3	71
Figura 36 – Curva de análise granulométrica para a amostra A4.1	71
Figura 37 – Curva de análise granulométrica para a amostra A4.2	72
Figura 38 – Curva de análise granulométrica para a amostra A5	72
Figura 39 – Curva de análise granulométrica para a amostra A6	73
Figura 40 – Difratoograma para a amostra A1	74
Figura 41 – Difratoograma para a amostra A2	74
Figura 42 – Difratoograma para a amostra A3	75
Figura 43 – Difratoograma para a amostra A4.1	75
Figura 44 – Difratoograma para a amostra A4.2	76
Figura 45 – Difratoograma para a amostra A5	76
Figura 46 – Difratoograma para a amostra A6	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo do Diagrama de Winkler	31
Tabela 2 – Resultados do ensaio de umidade	52
Tabela 3 – Resultados do ensaio de massa específica por picnômetro	52
Tabela 4 – Resumo dos resultados de limite de liquidez	53
Tabela 5 – Resumo dos resultados do limite de plasticidade	54
Tabela 6 – Resumo dos resultados do índice de plasticidade	54
Tabela 7 – Fracionamento e classificação das amostras	55
Tabela 8 – Fracionamento e classificação das amostras.	55
Tabela 9 – Classificação baseada no Diagrama de Winkler.	56
Tabela 10 – Associações minerais nas amostras.	56
Tabela 11 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A1.	62
Tabela 12 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A3.	63
Tabela 13 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A4.1.	64
Tabela 14 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A4.2.	65
Tabela 15 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A5.	66
Tabela 16 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A6.	67
Tabela 17 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A1.	68
Tabela 18 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A3.	68
Tabela 19 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A4.1.	68
Tabela 20 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A4.2.	69
Tabela 21 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A5.	69
Tabela 22 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A6.	69
Tabela 23 – Principais Argilominerais.	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	15
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Município de Crateús	17
2.1.1	<i>Solos</i>	18
2.1.2	<i>Hidrografia</i>	20
2.2	Argilas e argilominerais	21
2.3	Caracterização mineralógica	25
2.3.1	<i>Raios X</i>	25
2.3.2	<i>Difração de raios X</i>	27
2.4	Caracterização Física	28
2.4.1	<i>Análise de massa específica por picnometria a líquido</i>	28
2.4.2	<i>Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação</i>	29
2.4.3	<i>Limites de Atterberg</i>	32
3	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	34
3.1	Província mineral	34
3.1.1	<i>Registro Arqueano</i>	35
3.1.2	<i>Registro Paleoproterozoico</i>	35
3.1.3	<i>Registro Neoproterozoico</i>	36
3.2	Unidades litoestratigráficas	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Áreas de estudo	39
4.2	Materiais usados na amostragem	40
4.3	Materiais usados na caracterização	41
4.4	Amostragem	42
4.5	Preparação e codificação das alíquotas	43
4.6	Umidade	44

4.7	Massa específica por picnometria	44
4.8	Limites de Atterberg	45
4.9	Análise granulométrica	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	Amostragem	48
5.1.1	Área 1	48
5.1.2	Área 2	50
5.2	Caracterização física	52
5.2.1	Umidade e massa específica por picnômetro	52
5.2.2	Limite de liquidez e limite de plasticidade	53
5.2.3	Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação	55
5.3	Difração de raios X	56
6	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	62
	APÊNDICE A–RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE LIQUI- DEZ PARA AS AMOSTRAS A1, A3, A4.1, A4.2, A5 E A6.	62
	APÊNDICE B–RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE PLAS- TICIDADE PARA AS AMOSTRAS A1, A3, A4.1, A4.2, A5 E A6.	68
	APÊNDICE C–GRÁFICOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA PARA AS AMOSTRAS A1, A2, A3, A4.1, A4.2, A5 E A6. . .	70
	APÊNDICE D–DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS A1, A2, A3, A4.1, A4.2, A5, A6.	74
	ANEXOS	75
	ANEXO A–PRINCIPAIS ARGILOMINERAIS	78

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor de peças cerâmicas, isso muito se deve ao grande número de depósitos de argila espalhados pelo seu território. Contudo, uma elevada quantidade desses depósitos carece de estudos técnicos adequados, não havendo dessa forma informações suficientes que orientem seu uso industrial mais eficiente, bem como sua utilização mais consciente (MENEZES *et al.*, 2001).

Morais e Sposto (2006) destacam que a qualidade dos blocos cerâmicos se relacionam diretamente com a composição mineralógica, e aspectos físicos como granulometria e plasticidade. Além da qualidade da argila, outros fatores que podem influenciar a qualidade do produto final são o tipo de forno e o controle do processo de produção.

A composição mineralógica das argilas influi diretamente nas suas características plásticas. Argilas ricas em montmorillonita e illita geralmente apresentam elevada plasticidade, em contrapartida, argilas com presença de quartzo e minerais siliciosos apresentam baixa plasticidade (BAUER, 2000).

O controle da plasticidade é baseado na mistura de argilas não plásticas (argilas magras) com argilas plásticas (argilas gordas). Uma mistura inadequada acarreta no desperdício de matéria prima, elevação dos custos e na grande produção de peças quebradiças e com imperfeições, sendo essas peças tratadas como resíduo das atividades de processamento (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

Dessa forma, fica evidente a importância da realização de uma caracterização adequada sobre a matéria prima utilizada na confecção de peças cerâmicas, visando, dessa forma, o melhor aproveitamento dos recursos minerais, a diminuição dos custos operacionais e a diminuição de prováveis impactos ambientais causados pela geração da grande quantidade de resíduos

1.1 Justificativa

De acordo com Vidal *et al.* (2005), o Ceará tem se destacado no ramo da extração de argila e produção de peças cerâmicas na região nordeste, devido à quantidade de empresas atuando na área.

No ano de 2014 o estado do Ceará assumiu a 5ª posição no ranking nacional de produtores de peças cerâmicas. Nesse mesmo ano, o número de empresas atingiu 412 cerâmicas

em 51% dos municípios que compõem o estado, gerando 12 mil empregos diretos e 40 mil indiretos. A principal peça cerâmica produzida foi o tijolo que foi responsável por 77,3% da produção total e em segundo lugar as telhas com 32,10% da produção do estado (DIÁRIO DO NORDESTE, 2014). Com relação as reservas de argila, o Ceará dispõe de 234.694.493 toneladas de argila comum medida sendo 5.449.106 toneladas classificadas como lavrável (BRASIL, 2018).

Outro aspecto peculiar da atividade ceramista no Ceará é a forma como as empresas operam. Excetuando-se as grandes empresas localizadas próximas a grandes cidades, as demais não fazem qualquer estudo prévio acerca da forma, continuidade e volume dos depósitos, nem sobre as características tecnológicas das argilas (VIDAL *et al.*, 2005).

A ausência de estudos preliminares é refletida diretamente nos métodos de extração e beneficiamento, que na sua maioria são arcaicos. Isso, muitas vezes, gera uma baixa produção, elevado índice de perda e, em casos extremos, o esgotamento prematuro do depósito. No trabalho realizado por Braga *et al.* (2014) é apontado que a principal causa de problemas em empresas cerâmicas é a falta de informação sobre a matéria prima utilizada.

Em específico na região de Crateús, não existem trabalhos relacionados à caracterização do material argiloso usado na fabricação de peças cerâmicas, conforme é apontado por Teixeira e Cota (2019). Desta forma, o presente estudo apresenta-se como uma ferramenta importante, devido à necessidade da obtenção de informações acerca das características industriais/tecnológicas das argilas utilizadas na fabricação de peças cerâmicas na região de Crateús – CE, de modo a contribuir com a comunidade acadêmica e em especial com o setor ceramista local, permitindo que as empresas da região tenham condições de realizar uma produção mais eficiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar a caracterização tecnológica do material argiloso provenientes de depósitos aluvionares do Rio Poti, utilizado na produção cerâmica de duas empresas localizadas no município de Crateús no estado do Ceará.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a análise granulométrica do material argiloso;

- Calcular a massa específica da argila por meio de picnometria;
- Determinar os limites de Atterberg para o material;
- Identificar os minerais presentes na argila analisada por meio da técnica de difração de raios X;
- Avaliar a aplicabilidade do material analisado para a produção de peças cerâmicas visando um processo otimizado.

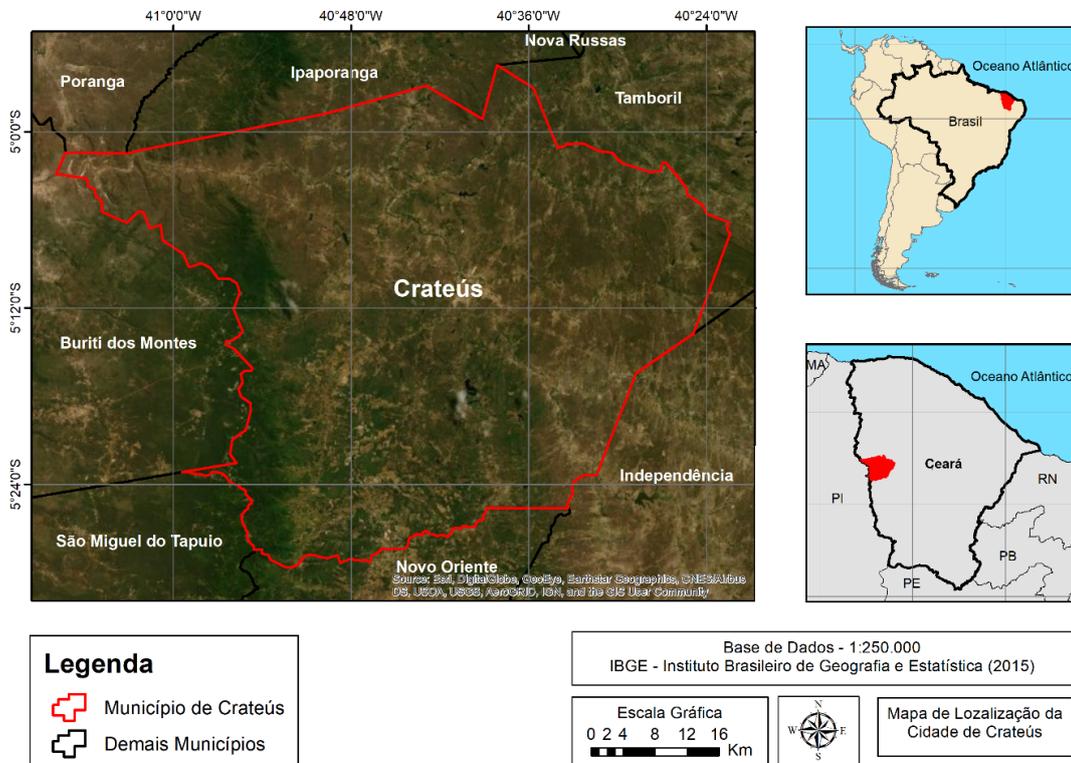
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com a intenção de habituar o leitor aos conceitos pertinentes ao trabalho, este capítulo abordará temáticas que vão desde as características relevantes do município onde foi realizado o estudo, até as técnicas e equipamentos usados para a caracterização da argila.

2.1 Município de Crateús

O Município de Crateús foi criado em 1880 por meio do Decreto 3.012, estando inserido na porção oeste do Estado do Ceará na Latitude (S) 5° 10' 42" e Longitude (WGr) 40° 40' 39" com uma altitude de 274,4 metros com relação ao nível do mar (CEARÁ, 2009). Atualmente, Crateús é componente da Microrregião de Planejamento Sertões de Crateús juntamente com os municípios de Ararendá, Catunda, Hidrolândia, Independência, Ipaporanga, Ipueiras, Monsenhor Tabosa, Nova Russas, Novo Oriente, Poranga, Santa Quitéria e Tamboril (CEARÁ, 2015). A Figura 1 mostra um mapa com a localização de Crateús.

Figura 1 – Mapa de Localização de Crateús



Fonte: Autoria Própria

2.1.1 Solos

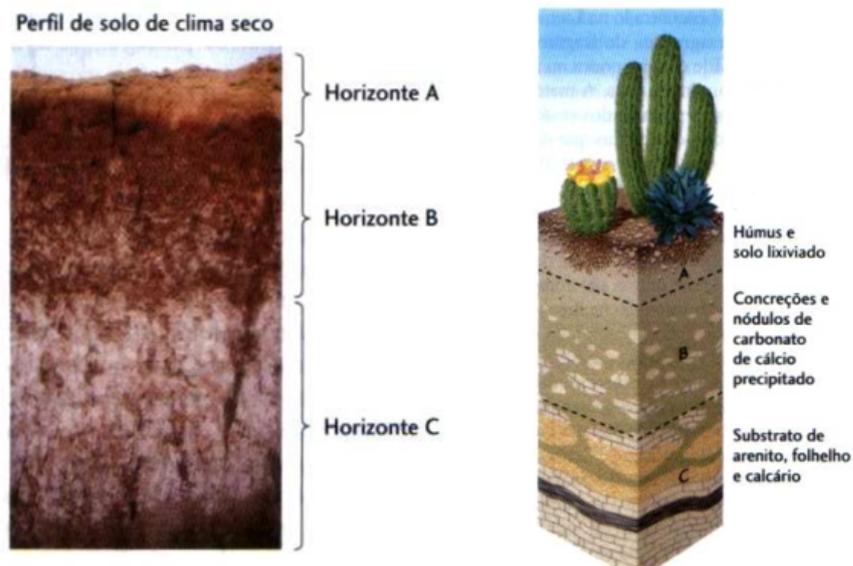
Por solo, entende-se uma coleção de corpos naturais constituídos de materiais sólidos, líquidos e gasosos, formados por minerais e material orgânico que ocupam a maior parte da superfície do planeta, contém organismos vivos e podem ser vegetados (SANTOS *et al.*, 2018). Para critérios de classificação e entendimento, os solos são compartimentados em camadas, que são os horizontes do solo.

“É uma seção de constituição mineral paralela à superfície do terreno, parcialmente exposta quando se observa o perfil do solo que lhe conferem características pedogenéticas de inter-relacionamento com outros horizontes componentes do perfil, dos quais se diferencia em virtude de diversidade em propriedades possuídas por ação de pedogênese” (LARACH *et al.*, 1988).

De modo geral, os horizontes do solo são três: horizonte A, horizonte B e horizonte C. O horizonte A é a camada superior do solo, geralmente rica em matéria orgânica, no horizonte B a matéria orgânica é mais esparsa e é onde geralmente se concentram os minerais mais solúveis e os óxidos de ferro, o horizonte C é formado pela rocha pouco alterada e intemperizada, nesse horizonte normalmente pode ser encontrada argila proveniente do intemperismo químico (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

Os horizontes do solo dependem das características da vegetação e do clima da região em que se encontram. Os horizontes do solo típicos para clima seco, como é o caso do Município de Crateús, podem ser vistos na figura 2.

Figura 2 – Horizontes do solo e características dos solos de clima seco

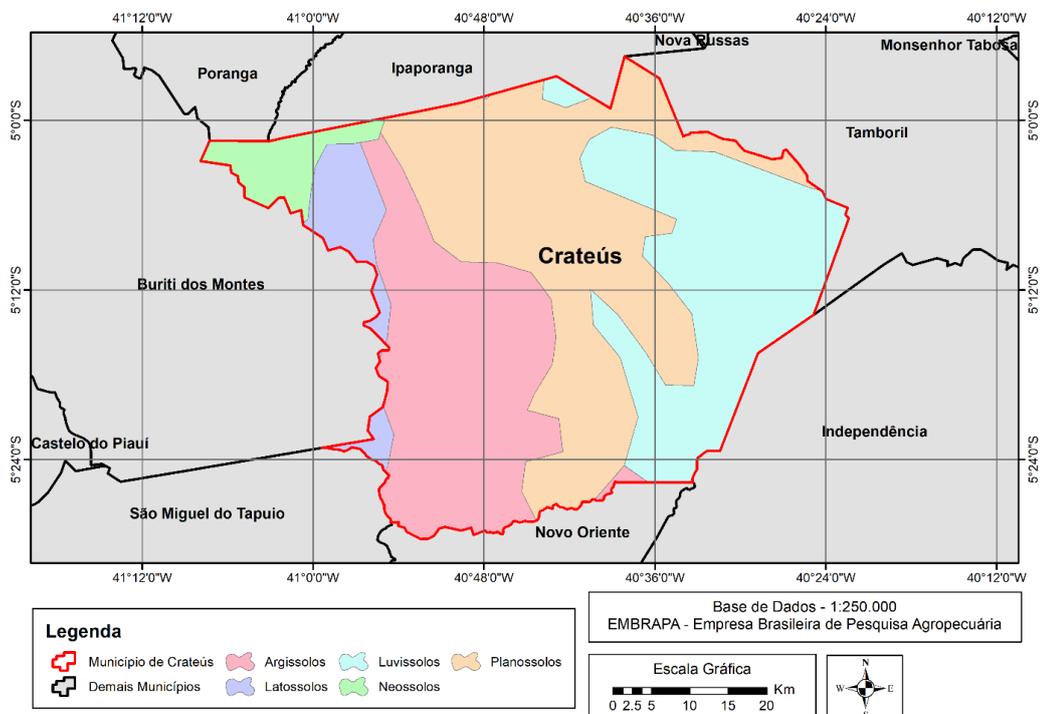


Fonte: Adaptado de Grotzinger e Jordan, (2013).

De acordo com a base cartográfica disponibilizada por EMBRAPA (2011), o Município de Crateús apresenta majoritariamente uma variedade de cinco solos distintos: argissolos, latossolos, luvisolos, neossolos e planossolos.

Os argissolos são identificados pelo elevado teor de argila, geralmente argila de baixa atividade (caulinita), nos horizontes superficiais do solo, a cor pode variar de acinzentada a avermelhada. Os latossolos são caracterizados por serem fortemente intemperizados e não apresentarem argila em profundidade, as cores variam de tons amarelados a acinzentados, a textura pode variar de média a muito argilosa com pequenos grãos. Os luvisolos podem ser identificados pela alta fertilidade química natural e pelo aumento significativo dos teores de argila nos horizontes da subsuperfície, esses solos apresentam cores que variam de tons avermelhados a tons amarelados. Os neossolos são caracterizados por serem pouco desenvolvidos, em geral são jovens e apresentam uma camada de matéria orgânica com menos de 20 cm de espessura. Os planossolos apresentam textura superficial arenosa, com elevado aumento de argila conforme sua profundidade aumenta, sua coloração geralmente é acinzentada e apresentam um perfil aluvionar esbranquiçado (BRASIL, 2020). Um mapa com a distribuição desses solos no município de Crateús é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição dos tipos de solos no município de Crateús

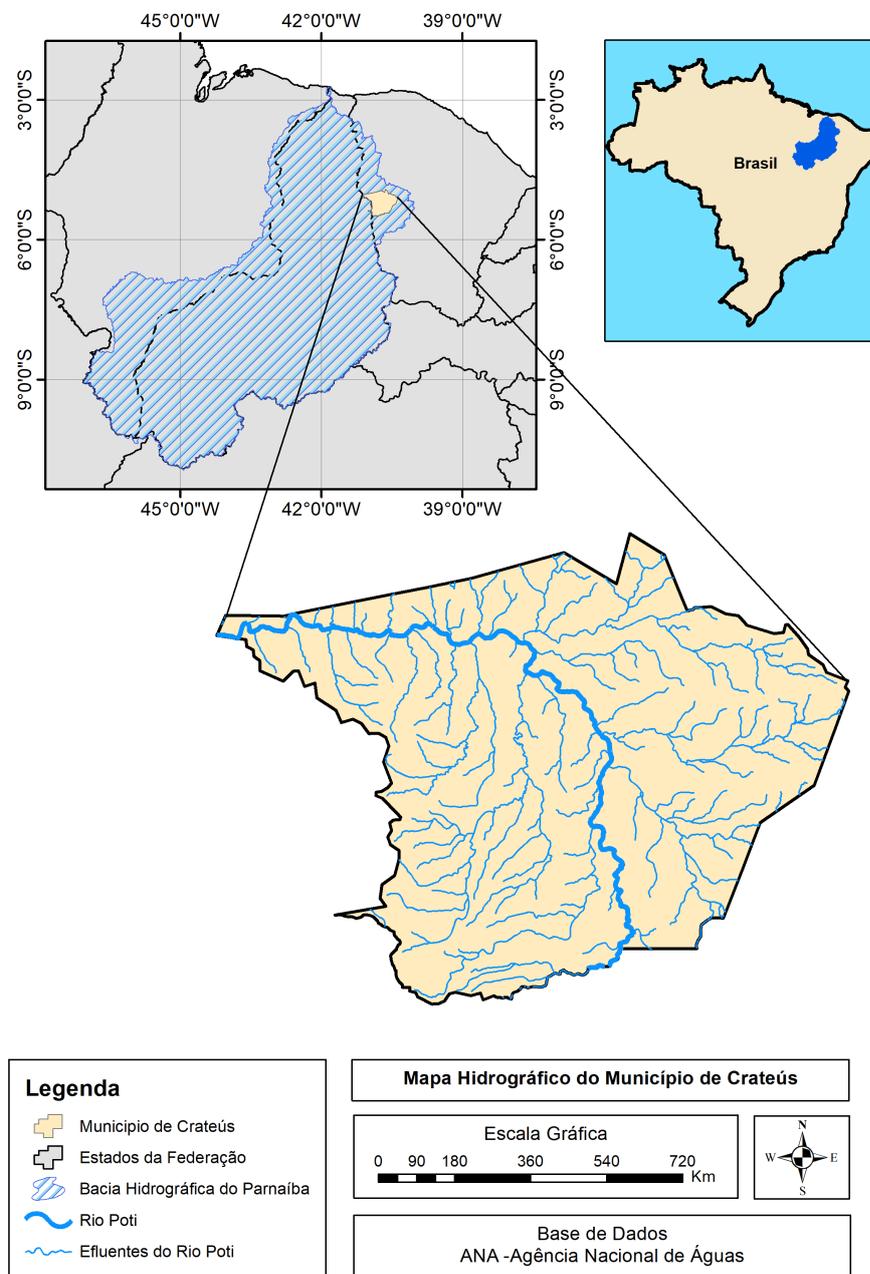


Fonte: Autoria própria.

2.1.2 Hidrografia

Segundo Ceará (2009), o Município de Crateús está inserido na Região Hidrográfica do Parnaíba. De acordo com Brasil (2006), a Região Hidrográfica do Parnaíba é uma das mais importantes da região Nordeste sendo ocupada pelos Estados do Piauí, Ceará e Maranhão, estando a maior parte concentrada no Estado do Piauí. Um mapa mostrando a Região Hidrográfica do Parnaíba e a parcela que abrange o Município de Crateús é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Rede hidrográfica do Município de Crateús



Fonte: Autoria própria.

A Bacia do Parnaíba foi dividida em três Sub-bacias de nível 1: Alto do Parnaíba, Médio Parnaíba e Baixo do Parnaíba, que são subdivididas em outras sete Sub-bacias menores de nível 2. O Município de Crateús está inserido na Sub-bacia, de nível 1, Médio do Parnaíba e na Sub-bacia, de nível 2, Parnaíba 6 onde o principal contribuinte é o Rio Poti (BRASIL, 2006).

O Rio Poti tem sua nascente localizada no Estado do Ceará entre os municípios de Novo oriente e Quiterianópolis. Segundo Brasil (2006), ele corre preferencialmente no sentido norte por 100 km, recebendo diversos tributários menores, e segue para oeste penetrando no Estado do Piauí através da Chapada da Ibiapaba, no Município de Castelo. Depois de cortar a Chapada da Ibiapaba ele se direciona para o sul por uma distância de aproximadamente 50 km, em seguida muda seu rumo para sudoeste até atingir o Município de Teresina e desaguar no Rio Parnaíba.

2.2 Argilas e argilominerais

O termo argila, por se tratar de um material complexo, pode ser definido de várias formas, de acordo com a área de aplicação. Na mecânica dos solos, por exemplo, a definição mais recorrente é sintetizada por Das *et al.* (2007) e Pinto (2006) que definem argila como a porção do solo com tamanho de partículas menor que $2\mu\text{m}$. Na área de materiais, a definição mais comum diz respeito à constituição química e mineralógica bem como as propriedades industriais e tecnológicas. Dessa forma, Santos (1989) propõe que argila é um material de ocorrência natural, terroso, com pequeno tamanho de partícula e que adquire plasticidade quando misturado com água, sua constituição química é dada majoritariamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio.

Segundo Obaje *et al.* (2013), as argilas podem ser produto de alteração argilácea devido a ação de fluidos hidrotermais, da ação de fontes termais e gêiseres e da ação intempérica dos agentes naturais sobre um material rochoso já consolidado, geralmente rochas ricas em aluminossilicatos.

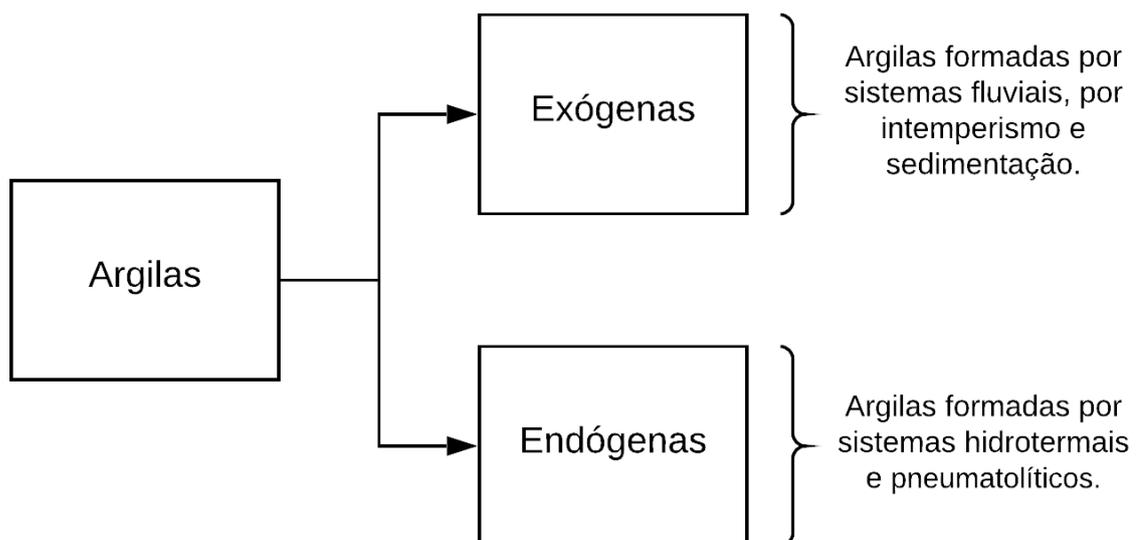
A natureza do material argiloso depende das características da rocha parental, do clima, da vegetação, do relevo e do tempo que esses fatores agiram sobre ele. Uma das principais formas pela qual clima, vegetação e relevo influenciam no processo de intemperismo é através do controle de fluxos de água através das zonas de alteração, sendo que a influência da constituição da rocha parental é maior nos estágios iniciais do intemperismo, perdendo importância conforme o tempo do processo aumenta (OBAJE *et al.*, 2013).

Com relação à classificação, vários são os sistemas disponíveis na literatura. Contudo, Santos (1989) apresenta um sistema de classificação estruturado a partir do uso industrial de cada argila. Sendo:

- Argilas plásticas para cerâmicas brancas (*ball-clays*);
- Argilas usadas na indústria de refratários (*fire clays*);
- Argilas comuns para cerâmica vermelha (*Common clays*).
- Argilas bentonitas (*bentonite clay*);
- Argilas caulinitas (*kaolin clay*). .

Outra classificação importante é apresentada por Obaje *et al.* (2013), sendo essa baseada na origem do material argiloso. Essa classificação é apresentada na Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Classificação das argilas quanto a sua origem



Fonte: Adaptado de Obaje *et al.*, (2013).

As argilas plásticas para cerâmicas brancas (*ball-clays*), são um tipo de argila rica em minerais de caulim com elevada plasticidade, são formadas por partículas de pequenos diâmetros, possuem longo intervalo de vitrificação e apresentam uma coloração branca-creme após a queima. Seu principal uso industrial se deve a sua adição em corpos cerâmicos visando prover maior plasticidade e vitrificação no produto final (O'BANNON, 2012).

De forma geral, as argilas usadas na indústria refrataria denominadas de *fire clays*, são materiais dentríticos que contém pequena quantidade de ferro na forma de óxidos, cal, magnésio e álcalis. Essa composição atribui propriedades refratárias ao material permitindo que suporte temperaturas superiores a 1500 °C. As argilas refratárias geralmente tem sua ocorrência

associada a camadas de carvão podendo ser encontradas sob as mesmas, sua cor pode variar em diferentes tons de cinza. As fire clays são principalmente empregadas na indústria de fabricação de refratários e para aumentar a temperatura de vitrificação de alguns produtos (AMPIAN, 1979).

As argilas usadas para a fabricação de peças cerâmicas vermelhas são denominadas de *common clays* e podem ser definidas como materiais argilosos que são suficientemente plásticos para permitirem ser moldadas e que tem uma temperatura de vitrificação abaixo de 1100°C. As argilas comuns são majoritariamente compostas pelos minerais illita ou clorita, contudo podem conter também caulim e montmorilonita, bem como óxidos de ferro, sendo que a cor avermelhada se deve justamente a presença desses óxidos. A sua principal aplicação industrial é na fabricação de peças cerâmicas (AMPIAN, 1979).

O termo bentonita foi usado pela primeira vez em Fort Benton (Wyoming – EUA) para designar um material argiloso com elevada plasticidade. Atualmente, é utilizado para se referir a uma argila com grande quantidade do mineral montmorilonita (SILVA; FERREIRA, 2008). Segundo Ampian (1979), a argila bentonita com grande concentração do íon sódio quando em contato com água sofre uma modificação substancial no seu volume (15 a 20 vezes seu volume seco), logo atribui-se a essa argila a denominação de expansiva. Os principais usos para argilas bentonitas se encontram na indústria de perfuração, em areias para fundição e na pelotização de minérios de ferro.

As argilas caulinitas, também denominadas de argilas da China (*China clay*) são argilas com coloração branca formadas predominantemente pelo mineral caulinita, o mineral haloisita e o mineral dickita. As argilas caulinitas apresentam uma densidade de 2,6 g/cm³ e um ponto de fusão na ordem de 1785°C. As argilas caulinitas apresentam uma grande variedade de usos industriais, dentre os mais importantes destacam-se: fabricação de papel, borracha, plástico e cerâmica (AMPIAN, 1979).

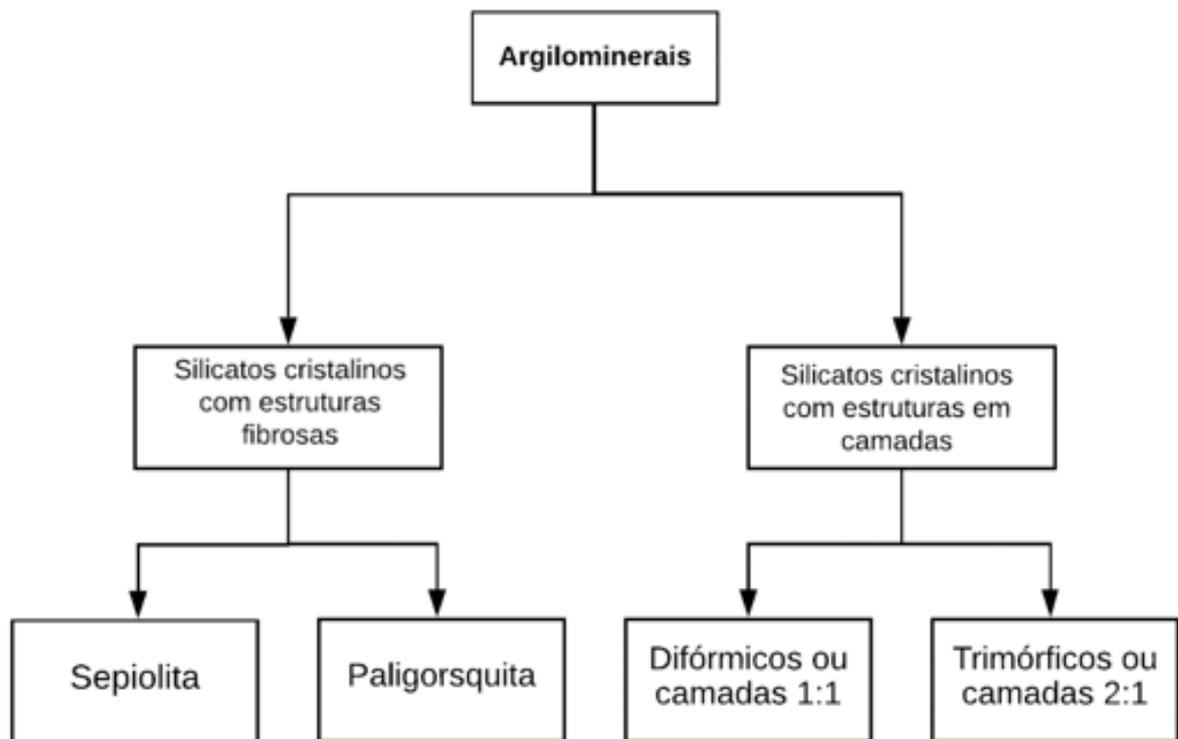
As argilas são formadas por um quantidade restrita de minerais denominados de argilominerais. Quimicamente, os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo teores de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Além de argilominerais, outros materiais comuns na composição de argilas são matéria orgânica, sais solúveis, materiais amorfos e os minerais pirita (FeS₂), quartzo (SiO₂), mica, calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂) (SANTOS, 1989)).

Mackenzie (1959), em consonância com o *Comité International pour l'Étude des Argiles*, recomenda uma classificação para argilominerais baseada nas suas características crista-

linas. A classificação consiste na divisão dos argilominerais em dois grupos distintos, os silicatos cristalinos com estrutura em camadas (*layer structure*) e silicatos cristalinos com estrutura fibrosa (*chain structure*). Os silicatos cristalinos com estrutura em camadas podem ser subdivididos em dois subgrupos com relação ao número de camadas que os formam, os tetraedros de quartzo (difórmicos ou camadas 1:1) e os octaedros de hidróxidos (trimórficos ou camadas 2:1), ambos formadores das células unitárias. Os silicatos cristalinos de estrutura fibrosa só possuem dois representantes a sepiolita ($\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) um silicato de magnésio complexo e a paligorsquita ($\text{Mg}_{10}\text{Si}_{16}\text{O}_{40}(\text{OH})_4 \cdot (\text{OH}_2)_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) que geralmente está associado a montmorilonita (COELHO *et al.*, 2007).

A classificação e os principais argilominerais são mostradas na Figura 6 e na Tabela 10 do anexo A, respectivamente.

Figura 6 – Classificação dos argilominerais quanto às características cristalinas



Fonte: Adaptado de Mackenzie (1959).

Contudo, muitas das características e classificações apresentadas não são de simples percepção. E dessa forma, é necessário submeter as amostras de interesse a técnicas e experimentos de modo a gerar resultados interpretativos que permitam o reconhecimento de suas características mais importantes. Uma revisão sobre as técnicas, equipamentos e princípios físico-químicos é realizada nos tópicos seguintes.

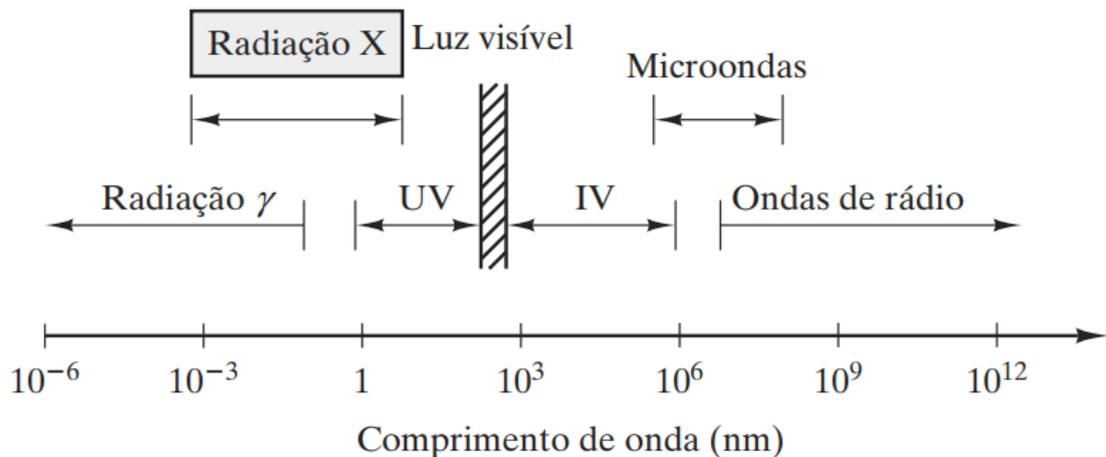
2.3 Caracterização mineralógica

A principal técnica usada na identificação mineralógica de amostras de argila é a difratometria de raios X. Essa técnica tem como base conceitos físicos ondulatórios e de atomística, sendo desenvolvida a partir do conhecimento acerca da existência da radiação X.

2.3.1 Raios X

De acordo com Guinier (1994), os raios X são radiações transversais eletromagnéticas, semelhantes a luz branca do espectro visível, com comprimentos de onda que variam de 0,1 à 100Å. O intervalo de comprimento de onda correspondentes aos raios-X são mostrados na Figura 7, sendo que esse intervalo se estende desde os comprimentos de onda da radiação ultravioleta à comprimentos da ordem da radiação gama (SHACKELFORD, 2008).

Figura 7 – - Intervalo de comprimentos de onda para radiação X



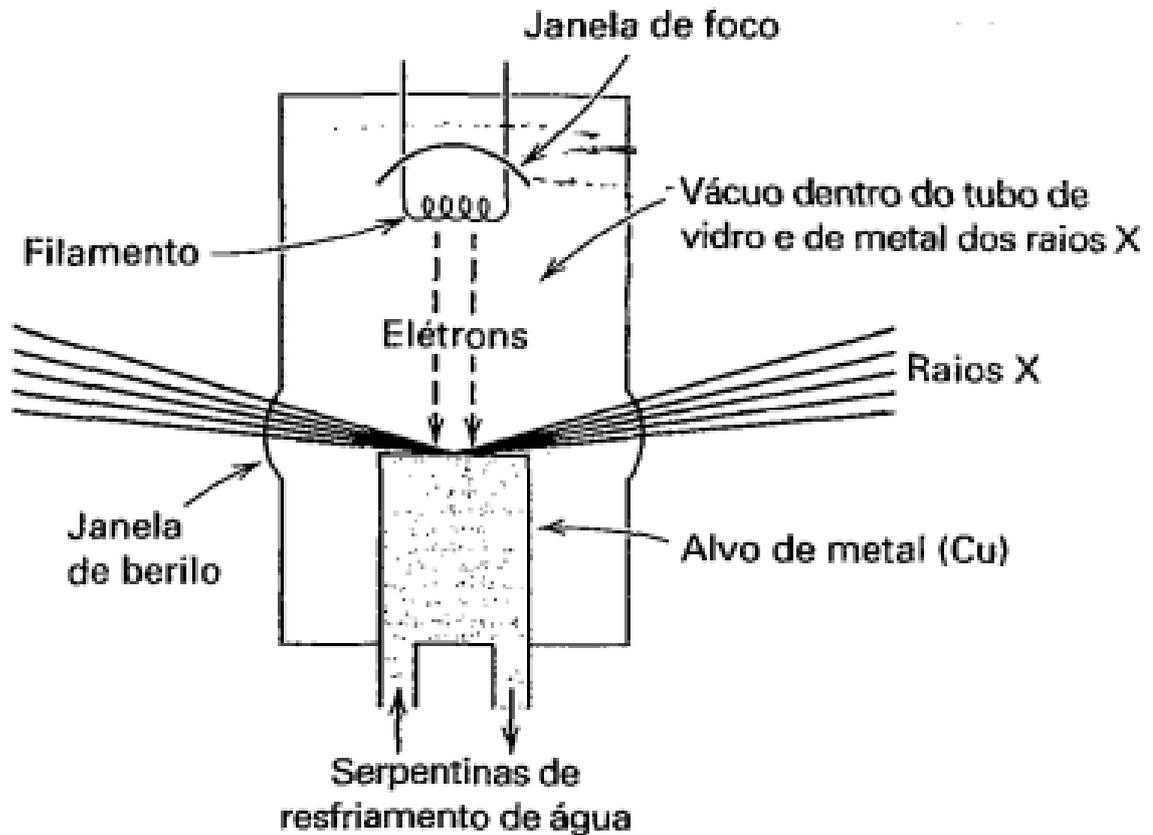
Fonte: Adaptado de (SHACKELFORD, 2008).

Segundo Klein e Dutrow (2009), os raios X contínuos são produzidos pelo choque entre elétrons acelerados em alta velocidade e os átomos de algum elemento. Já os raios X característicos são gerados quando um elétron que ocupa uma camada mais externa (mais energética) passa a ocupar uma camada mais interna (menos energética), liberando a energia em forma de fóton.

Os raios X são geralmente produzidos em um tubo de raios X (Figura 8), sendo composto por um filamento de tungstênio (cátodo) que funciona como a fonte de elétrons e um alvo (ânodo) onde será realizado o bombardeio. Para a emissão dos raios X o filamento de tungstênio é aquecido pela passagem de uma corrente elétrica, em seguida os elétrons são

acelerados em direção ao alvo por uma diferença de potencial, no momento da colisão é gerada a radiação X (KLEIN; DUTROW, 2009).

Figura 8 – - Exemplo de tubo de raios X



Fonte: Adaptado de Klein e Dutrow (2009).

O comprimento de onda da radiação gerada pela colisão depende do material do alvo e da diferença de potencial utilizada. Nenhum raio X é produzido até que seja atingido um determinado valor para a diferença de potencial, esse valor depende do material usado como alvo. A partir desse valor, os raios X contínuos são criados formando o espectro contínuo. Com o aumento da diferença de potencial, excedendo um valor crítico, os elétrons produzidos pelo filamento têm energia suficiente para deslocar os elétrons das camadas mais internas dos orbitais atômicos, quando isso ocorre os elétrons das camadas mais externas passam a ocupar a posição vazia dos elétrons deslocados. Essa movimentação entre os níveis energéticos desprende energia na forma de raios X característicos, gerando o espectro característico. Esse tipo de radiação X produz picos de energia muito mais expressivos que a radiação X contínua (KLEIN; DUTROW, 2009).

2.3.2 Difração de raios X

O fenômeno de difração de raios X se deve ao espalhamento da radiação por um conjunto regular de centros de difusão, cujo espaçamento entre os centros é aproximadamente igual ao comprimento de onda da radiação incidente. Para a radiação X o espalhamento se dá pela interação de um fóton de radiação eletromagnética com um elétron que orbita um átomo, geralmente de um cristal (SHACKELFORD, 2008).

Ao incidir um feixe de raios X em uma substância cristalina ele sofre um desvio em sua trajetória em todas as direções pelos átomos que compõe o cristal. Em algumas direções os raios X sofrem interferência destrutiva e em outras sofrem interferência construtiva produzindo máximos de intensidade. Esse processo representa a forma como os raios X sofrem difração (HALLIDAY *et al.*, 2009).

Segundo Callister (2000), para ocorrer interferência construtiva durante o espalhamento dos raios X é necessário que a diferença entre as trajetórias percorridas pelos feixes de radiação com ângulo de incidência igual seja um número inteiro de comprimentos de onda. Neste sentido, tem-se o enunciado teórico para a Lei de Bragg mostrada na equação 2.1.

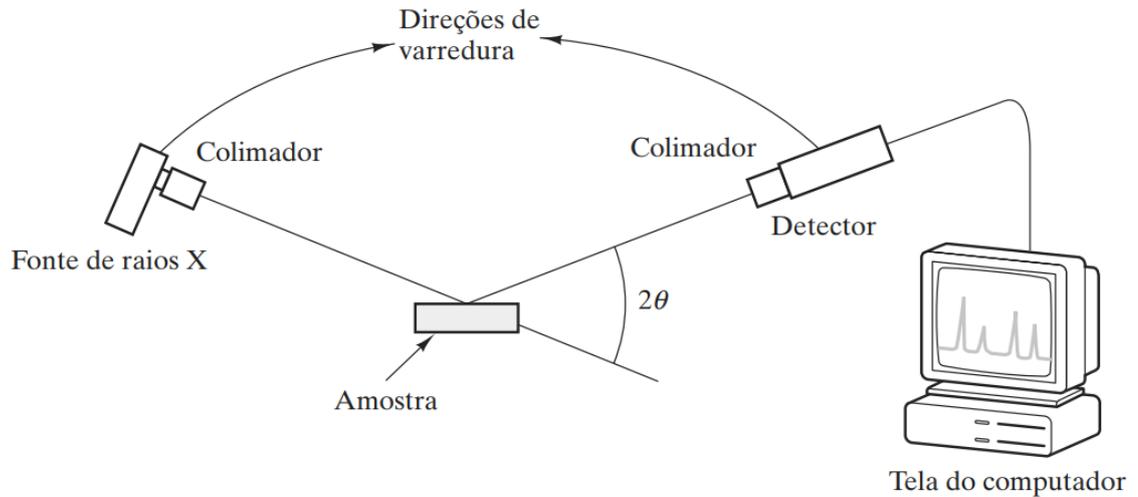
$$n\lambda = 2d\sin(2\theta) \quad (2.1)$$

Onde n é um número inteiro positivo, λ é o comprimento de onda da radiação incidente, d é a distância entre os planos do cristal analisado e θ é o ângulo entre a radiação e um vetor normal ao plano cristalográfico.

O equipamento usado para determinar os ângulos nos quais ocorre a difração dos raios X em amostras pulverizadas é chamado de difratômetro. Um esquema simplificado é mostrado na Figura 9. O aparelho é composto por uma fonte de raios X, por uma amostra disposta em formato de chapa, um coletor e colimadores (CALLISTER, 2000). Esse sistema é conectado a um computador para gerar os gráficos com os padrões de difração, de modo a permitir a identificação das substâncias por meio da comparação com padrões já catalogados.

Atualmente, a base de dados mais completa sobre padrões de difração para amostras em pó é a PDF (*Powder Diffraction File*). Nessa base de dados, cada padrão de difração inclui uma tabela contendo a distância interplanar dos cristais, índices de Miller, ângulos de difração, intensidade dos picos difratados, composição química, nome do componente, nome do mineral, sistema cristalino e características físicas (KLEIN; DUTROW, 2009).

Figura 9 – - Esquema simplificado de um difratômetro de raios X



Fonte: Adaptado de SHACKELFORD (2008).

De acordo com Albers *et al.* (2002), a difratometria de raios X é a técnica mais indicada para a determinação das fases cristalinas em materiais cerâmicos. E dentre as vantagens da técnica, destaca-se a simplicidade e confiabilidade dos resultados em relação à determinação de fases em cristais.

Com relação a caracterização de argilominerais, à difratometria de raios X é ainda mais indicada, pois uma análise puramente química destacaria os elementos químicos, mas não a forma como eles estão ligados, o que tornaria a identificação dos minerais muito complexa (ALBERS *et al.*, 2002).

2.4 Caracterização Física

A caracterização física, diz respeito a um conjunto de técnicas que tem por objetivo a identificação de propriedades de natureza física do material ensaiado. No caso do estudo de argilas, algumas propriedades físicas merecem destaque, dentre elas: massa específica, índices de plasticidade e tamanho de partícula.

2.4.1 Análise de massa específica por picnometria a líquido

A massa específica é uma propriedade intensiva que pode ser definida como a razão entre as grandezas massa e volume, ou seja, é um valor obtido através da divisão de duas propriedades extensivas (ATKINS *et al.*, 2018). Matematicamente, a massa específica é a razão

entre a massa da substância e o seu volume, conforme Equação 2.2:

$$M.E = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} = \frac{m}{v} \quad (2.2)$$

Na área do tratamento de minérios, o material utilizado na caracterização comumente se encontra na forma de grãos. Logo, existe a necessidade de se fazer uma distinção no conceito de massa específica, levando em consideração o espaço vazio nos interstícios dos grãos (SAMPAIO *et al.*, 2007). Dessa forma, tem-se:

- Massa específica real ou relativa: o espaço vazio entre os grãos não é considerado;
- Massa específica aparente: o espaço vazio entre os grãos é levado em consideração.

No caso de materiais desagregados, como são as argilas, uma técnica com boa precisão e grande praticidade para a determinação da massa específica relativa é a picnometria. O princípio da técnica consiste em avaliar a massa, em balança de precisão, do conjunto formado pelo picnômetro, por um líquido de densidade bem estabelecida e do material do qual se deseja calcular a densidade.

2.4.2 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

O peneiramento é o método mais antigo e o mais utilizado para análise granulométrica em laboratório. As peneiras frequentemente usadas apresentam uma superfície de peneiramento denominada de malha que é formada, quase sempre, por fios trançados perpendicularmente (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

A quantidade de aberturas existentes por polegada linear é chamada de mesh que é expresso pelo símbolo (#). A análise granulométrica por peneiramento é caracterizada pela utilização de uma série padronizada (escalas granulométricas) de peneiras que geralmente guardam uma relação (progressão geométrica) com relação as suas aberturas (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

Dentre as series de peneiras criadas, a que mais foi difundida nos laboratórios foi a serie Tyler. Para se construir a série Tyler, parte-se de uma peneira de referência com abertura de 0,074 mm (200 mesh) e multiplica-se o valor da abertura pela razão da série ($\sqrt{2}$), o produto obtido corresponde a abertura da peneira imediatamente acima (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Para a realização do experimento as peneiras que compõem a série são empilhadas e presas em ordem crescente de abertura. Com a série formada, a coluna de peneiras é fixada em uma base vibratória com intensidade programável. O resultado do peneiramento é a análise

granulométrica, que geralmente é expressa na forma de tabelas ou gráficos.

Valadão e Araujo (2007), apontam alguns fatores que podem influenciar no resultado de uma análise granulométrica, são eles:

- Amostra: a amostra deve ser representativa;
- Tempo de peneiramento: o tempo de peneiramento deve ser adequado a cada tipo de material. Um procedimento recomendável é encontrar o tempo de peneiramento através de ensaios sucessivos com tempo decrescentes até que a massa passante em uma ou mais peneiras não varie mais do que 0,1%;
- Tipo de peneiramento: as características do material como umidade, tendência a agregação e quantidade de finos devem ser levados em consideração.

A sedimentação é uma técnica de classificação destinada a granulometrias finas do solo, geralmente abaixo de $2\mu\text{m}$, sendo utilizada de maneira complementar a técnica de peneiramento.

A sedimentação é fundamentada nos conceitos referentes a velocidade terminal, que é a velocidade alcançada quando a força gravitacional e a força imposta ao deslocamento de uma partícula pela resistência de um fluido se igualam. As características da força de resistência do fluido, em maior escala, dependem da velocidade de queda das partículas. Para baixas velocidades o deslocamento é mais suave, visto que a lâmina de fluido em contato com a partícula acompanha o seu movimento e o restante do fluido se mantém parado. Para velocidades elevadas a resistência é atribuída a perturbação presente no fluido já que não há porções estáticas do mesmo. Essas duas situações são denominadas de regime laminar e turbulento respectivamente (SAMPAIO *et al.*, 2007).

A sedimentação ainda pode ser classificada de acordo com a porcentagem de sólidos presentes na polpa: para valores menores que 15% em porcentagem de sólidos a sedimentação é dita em queda livre; já para valores superiores a 15% em portagem de sólidos a sedimentação é denominada em queda impedida (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Contudo, apesar de algumas pequenas modificações, a velocidade terminal pode ser calculada a partir da equação de Stokes conforme é apresentado na Equação 2.3 a seguir.

$$V = \frac{(4r^2g)(d_s - d_f)}{18\gamma} \quad (2.3)$$

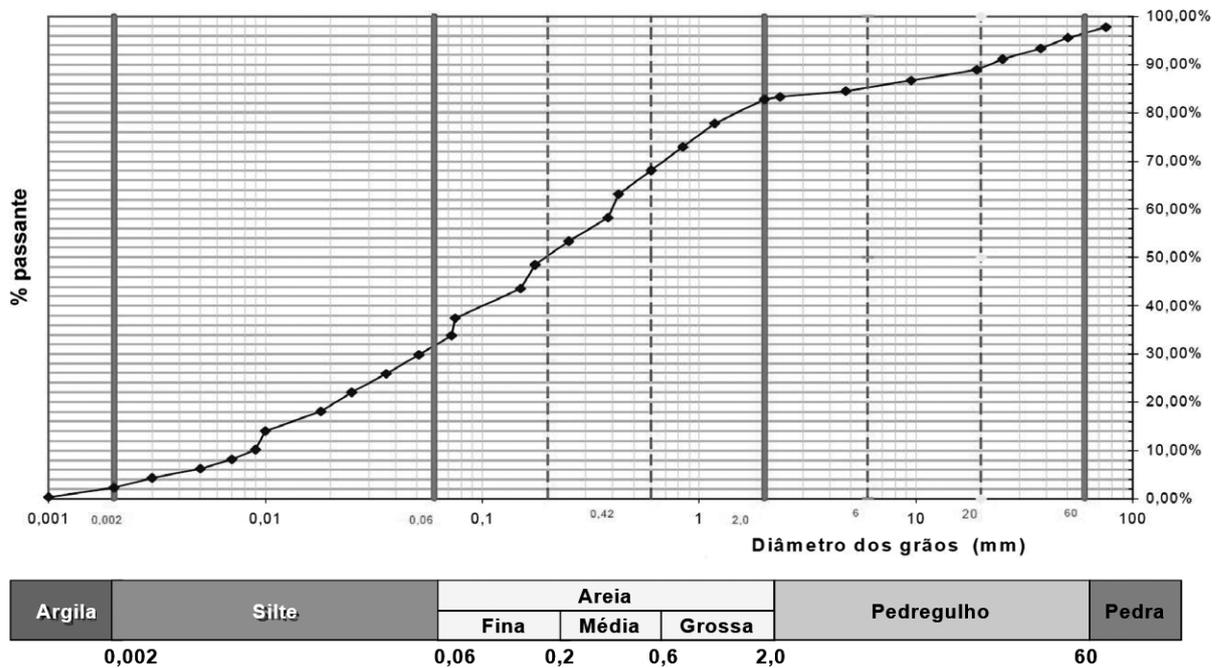
Onde:

- r = raio esférico das partículas;

- d_i = densidade do sólido;
- d_f = densidade do fluido;
- g = aceleração da gravidade;
- γ = viscosidade do fluido.

A ABNT 6502 (1995) estabelece uma classificação para as frações do solo baseada nos ensaios de análise granulométrica. Essa classificação é mostrada na Figura 10 a seguir.

Figura 10 – - Frações do solo estabelecidas pela ABNT



Fonte: Adaptado de ABNT 6502 (1995)

No trabalho desenvolvido por Pracidelli e Melchiades (1997) é apresentada uma recomendação indicando os melhores usos para argilas de acordo com sua classificação granulométrica. Essas recomendações são baseadas no Diagrama de Winkler e um resumo é apresentado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Resumo do Diagrama de Winkler

Produtos	Composição granulométrica (%)		
	2 μ m	2 a 20 μ m	20 μ m
A. Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B. Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C. Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D. Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: Adaptado de Pracidelli e Melchiades (1997)

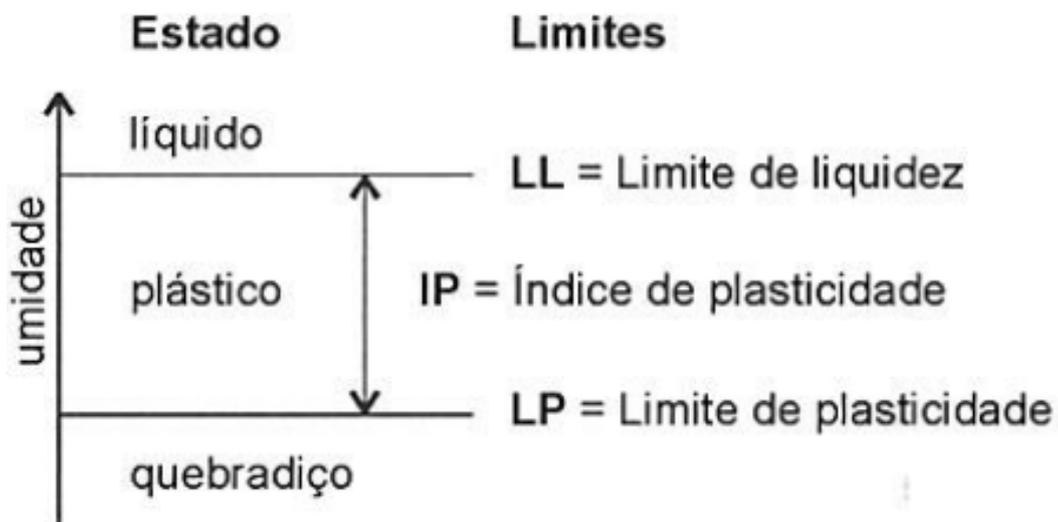
2.4.3 Limites de Atterberg

Segundo Pinto (2006), os argilominerais diferem enormemente quanto a sua estrutura mineralógica e propriedades de adsorção. Dessa maneira, dois determinados solos que apresentem a mesma fração argila podem ter propriedades mecânicas bastante diferentes. Logo, é necessária uma forma prática de mensurar a influência da porção argilosa no comportamento dos solos. Difundiu-se, para tal, o emprego dos índices, ou limites, e ensaios propostos por Atterberg e modificados por Casagrande.

Os limites de Atterberg baseiam-se na constatação que as propriedades de um material argiloso variam bruscamente com a modificação do seu teor de umidade, que pode ser definido como a razão entre o peso de água e o peso de sólidos em um dado volume de solo. Dessa forma, percebeu-se que com um elevado teor de umidade em um material argiloso, mais ele se comportará mecanicamente como um fluido, com um teor de umidade intermediário ele se comportará como um material plástico e com um valor baixo de teor de umidade ele se comportará como um material quebradiço (PINTO, 2006).

Santos (1989), define plasticidade como a capacidade que um material argiloso tem em deformar-se mediante a aplicação de uma tensão e manter essa deformação após a retirada da tensão atuante. No ramo de fabricação de peças cerâmicas, a importância da plasticidade do material consiste na impossibilidade de moldagem dos blocos por extrusão caso a argila não seja adequadamente plástica. Os teores de umidades correspondentes as mudanças de estado são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Teores de umidade e estados do material



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

O Limite de Liquidez é comumente definido como o teor de umidade presente numa amostra, com o qual uma ranhura presente nele requer 25 golpes para se fechar completamente em um recipiente na forma de concha (PINTO, 2006).

O Limite de Plasticidade (LP) é definido como o menor teor de umidade no qual se consegue moldar, com a palma da mão, um cilindro de aproximadamente 3 mm de diâmetro. E por fim, o Índice de Plasticidade é obtido através da diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade (PINTO, 2006). No Brasil, o procedimento experimental para a obtenção do Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade é descrito na ABNT 6459 (1984) e ABNT 7180 (1981), respectivamente.

Baseando-se na consulta de vários autores, Macedo *et al.* (2008) sugere os valores ideais para o Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade em materiais argilosos visando a sua utilização na fabricação de blocos cerâmicos, são eles:

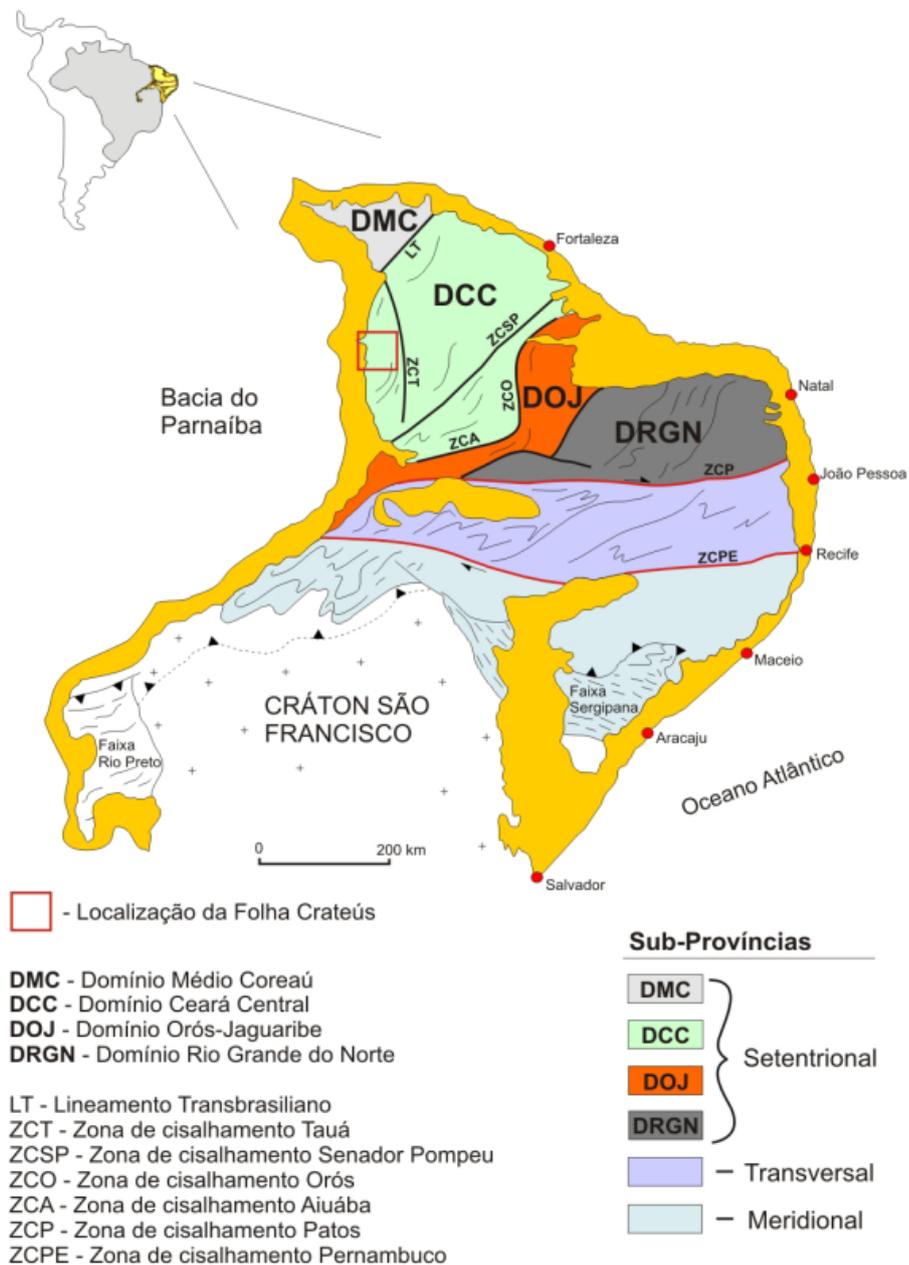
- Limite de Liquidez (30 à 60%);
- Limite de Plasticidade (15 à 30%);
- Índice de Plasticidade (10 à 30%).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 Província mineral

A maior parte do Município de Crateús se encontra na Província Borborema, sendo uma pequena porção pertencente a Província Parnaíba (Figura 12). Segundo Almeida *et al.* (1981), a Província Borborema ocupa uma área de 380000 Km² no Nordeste brasileiro sendo limitada pela Bacia Sedimentar do Parnaíba, a Província São Francisco e pela costa oceânica.

Figura 12 – Província Borborema e subdivisões



Fonte: Adaptado de Costa (2017).

A Província Borborema é subdividida em três grandes sub-províncias: Setentrional, Transversal e Meridional. O Município de Crateús está inserido na Sub-província Setentrional que por sua vez é dividida em domínios: Médio Coreaú, Ceará Central, Orós-Jaguaribe e Rio Grande do Norte. Crateús está localizado no Domínio Ceará Central (COSTA, 2017).

O Domínio Ceará Central é limitado na direção oeste pelo Lineamento Transbrasiliiano e a leste pelo Lineamento Senador Pompeu (ANCELMI *et al.*, 2013). No trabalho realizado por Arthaud *et al.* (2008), é feita uma sugestão de divisão desse domínio: Registro Arqueano, Registro Paleoproterozoico e Registro Neoproterozoico. Essa divisão, bem como suas principais características são apresentadas nos tópicos seguintes.

3.1.1 Registro Arqueano

Rochas do Arqueano são encontradas em três áreas distintas do Domínio Ceará Central, são elas:

- Maciço São José do Campestre: nessa área podem ser encontradas rochas cálcio-alcálicas com idades de 3,45 Ga, na sua borda podem ser encontrados gnaisses paleoproterozoicos afetados por magmatismo e tectonismo. A porção de rochas plutônicas mais jovens nessa zona são sienogranitos datados de 2,7 Ga;
- Unidade Granjeiro: essa unidade é formada por rochas plutônicas (tonalitos e granodioritos) e rochas metassedimentares. A foliação das rochas se torna vertical nas proximidades da zona de cisalhamento;
- Complexo Mombaça e Cruzeta: esse complexo é composto principalmente por gnaisses migmatíticos e granodioritos com faixas que se alternam entre tonalitos e granitos. Nesse complexo também são comuns boudins ultramáficos sendo alguns mineralizados por cromita, veios de quartzo com presença de feldspatos também se fazem presentes e pegmatitos são comumente observados chegando a representar metade do volume de rocha da região.

3.1.2 Registro Paleoproterozoico

Quatro grandes assembleias de rochas formam o Registro Paleoproterozoico, são elas:

- Associações Gnaisses-Migmatíticos: essas associações cobrem grande parte da região norte da Província Borborema e compreendem basicamente ortognaisses e granodioritos

metamorfisados;

- Unidade Madalena: essa unidade é composta por quartzo, dioritos e diques de microdioritos. Em geral essas rochas são pouco deformadas e não apresentam migmatização;
- Unidade Algodões: essa unidade engloba principalmente anfibolitos e gnaisses apresentando também ocorrências de grafita e quartzo micáceo;
- Cinturão Orós-Jaguaribe: aqui ocorre a predominância de sequências de rochas metavulcano-sedimentar associados à ortognaisses. Ocorrem também xistos ricos em Al e faixas estreitas com lentes de mármore rico em Ca ou Mg.

3.1.3 Registro Neoproterozoico

O Registro Neoproterozoico é composto por dois grupos de rochas e uma assembleia, são eles:

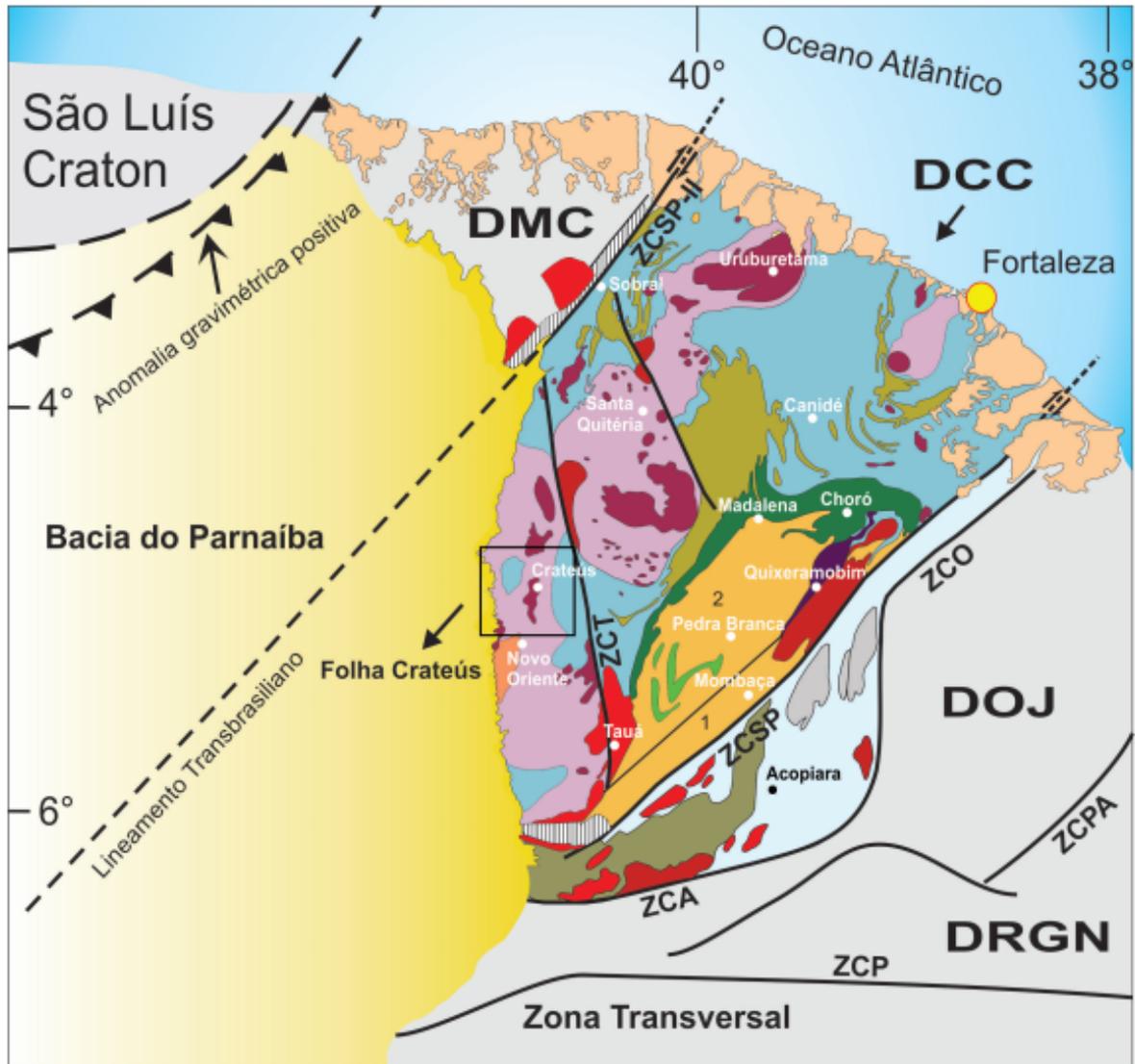
- Grupo Ceará: é uma grossa camada de rochas metassedimentares associadas com discretas faixas de quartzo, ocorrências de minerais contendo alumínio e lentes ricas em mármore e calcário;
- Grupo Seridó: compreende camadas de rochas metassedimentares com presença de gnaisses, calcários, mármore e quartzo;
- Complexo Tamboril – Santa Quitéria: é composto majoritariamente por rochas ígneas e metassedimentares. Esse complexo é caracterizado pela intrusão de grandes volumes de magma na forma de diques e veios, a composição dessas intrusões variam de dioritos, granodioritos a granitos.

3.2 Unidades litoestratigráficas

Segundo o mapeamento realizado pela CPRM (Figura 13) para compor o trabalho de Costa (2017), a maior parcela do território pertencente ao Município de Crateús faz parte das unidades litoestratigráficas denominadas como: Complexo Canindé do Ceará (PRcn) e Complexo Tamboril-Santa Quitéria (NP3ts).

A principal litologia presente no Complexo Canindé do Ceará é formada por gnaisses e migmatitos paraderivados com elevada quantidade de quartzo, feldspato e biotita podendo ocorrer de maneira mais discreta granadas e silimanita. Na porção noroeste da Folha Crateús foram encontrados lentes de quartzitos com presença de moscovita, também é comum a ocorrência de

Figura 13 – Unidades Litoestatigráficas



Fonte: Adaptado de Costa (2017).

lentes de calcário metamorfoisado relacionados a gnaisses migmatizados (COSTA, 2017).

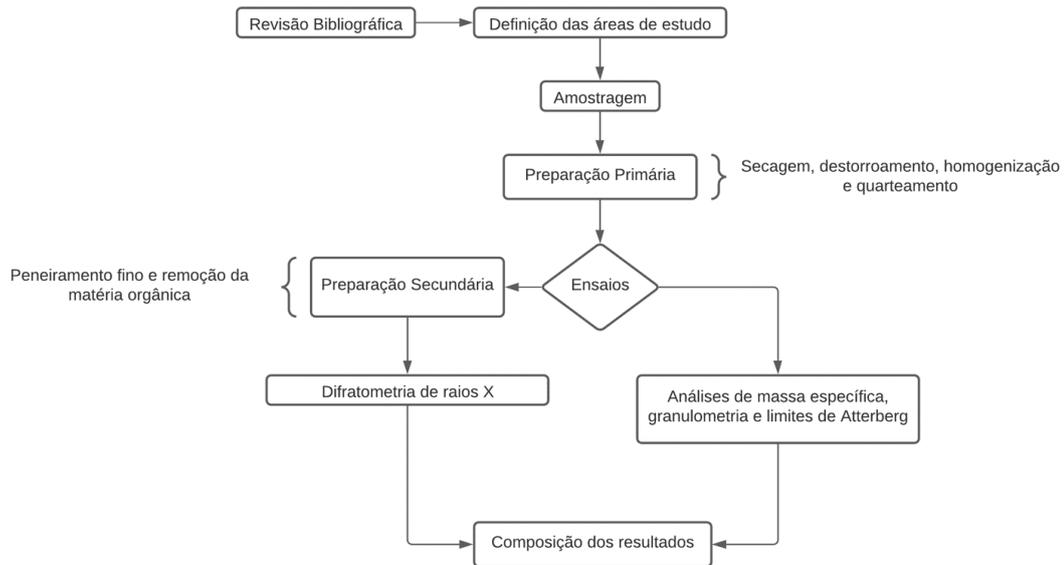
O Complexo Tamboril-Santa Quitéria abrange a maior parte da área do Município de Crateús. De acordo com Costa (2017) três unidades magmáticas principais são destacáveis:

- Diatexitos: os Diatexitos são as rochas predominantes na área representados por uma granulometria grossa e uma constituição granítica ricas em feldspato alcalino e biotita. A composição das rochas variam em (20 – 30%) de feldspato alcalino, (15– 25%) de plagioclásio, (10 – 20%) de biotita e (15 a 25%) de quartzo (COSTA, 2017);
- Granitos Híbridos: O termo Granito híbrido é usado para designar a associação composta por monzonita, quartzo monzonito e quartzo sienito presente no Complexo Tamboril - Santa Quitéria. Esse material rochoso apresenta grau médio de deformação e tem como principais minerais máficos a hornblenda e a biotita. A composição mineralógica dessas rochas variam em 30% de plagioclásio, 15% de feldspato alcalino, (5 – 10%) de quartzo, 25% de hornblenda e 10% de biotita (COSTA, 2017);
- Quartzodioritos: os Quartzodioritos são as rochas plutônicas menos evoluídas da região. São encontradas principalmente na forma de intrusões no interior dos diatexitos. São encontrados principalmente com granulação média, sua composição mineralógica varia em 40% de plagioclásio, 30% de hornblenda, 15% de clinopiroxênio, 5% de biotita, 5% de feldspato alcalino e 5% de quartzo (COSTA, 2017);
- Granitoides Santa Quitéria: esses granitoides são representados por quartzo-monzonitos, quartzo-sienitos e sienitos. Em geral os quartzo-monzonitos são mais comuns na região do Município de Crateús (COSTA, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse tópico descreve os materiais e a metodologia utilizada, bem como o local de realização dos ensaios. A metodologia aplicada é mostrada resumidamente no fluxograma da Figura 14.

Figura 14 – Resumo da metodologia aplicada



Fonte: Autoria Própria

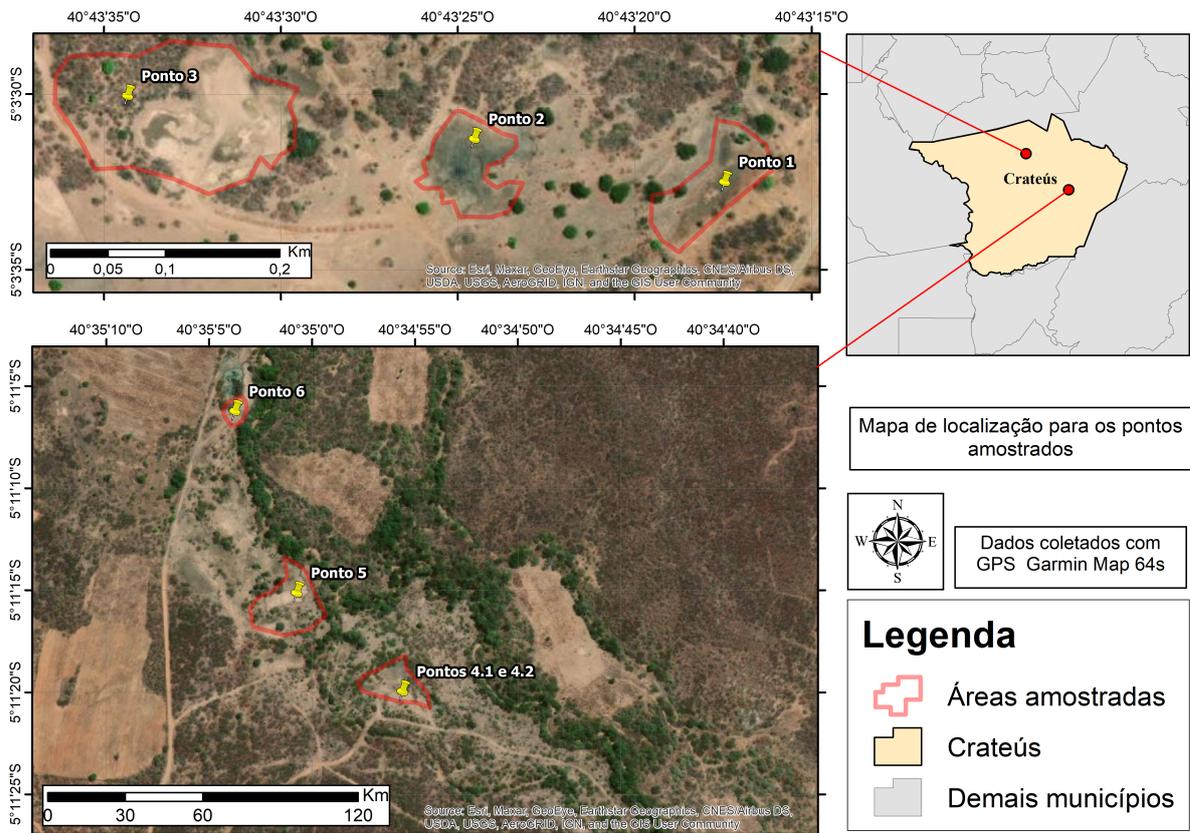
4.1 Áreas de estudo

O material argiloso foi coletado em duas áreas onde duas empresas distintas fazem a extração de argila visando a confecção de peças cerâmicas.

No município de Crateús, de acordo com os dados disponibilizados pela plataforma Sigmime, apenas uma empresa possui área requerida para extração de argila, as demais realizam a extração somente com a licença municipal. Em geral, as áreas em que ocorre a extração se encontram ao longo das margens do rio Poti.

Visando garantir a representatividade das amostras coletadas foi realizada uma análise prévia das duas áreas de interesse. Essa análise consistiu do reconhecimento de zonas onde a argila era predominantemente a mesma, dessa forma foi possível discretizar três zonas na Área 1 e duas zonas na Área 2. Essas informações são mostradas no mapa da Figura 15.

Figura 15 – Mapa de localização para os pontos de amostragem



Fonte: Autoria Própria

4.2 Materiais usados na amostragem

Os materiais usados na fase de amostragem da argila foram:

- GPS (*Global Positioning System*);
- Boca de lobo;
- Bússola geológica;
- Balde plástico;
- Sacos plásticos;
- Pincel a prova d'água;
- Facão;
- Pá.

Todos esses materiais foram disponibilizados pela prefeitura do campus da Universidade Federal do Ceará em Crateús.

4.3 Materiais usados na caracterização

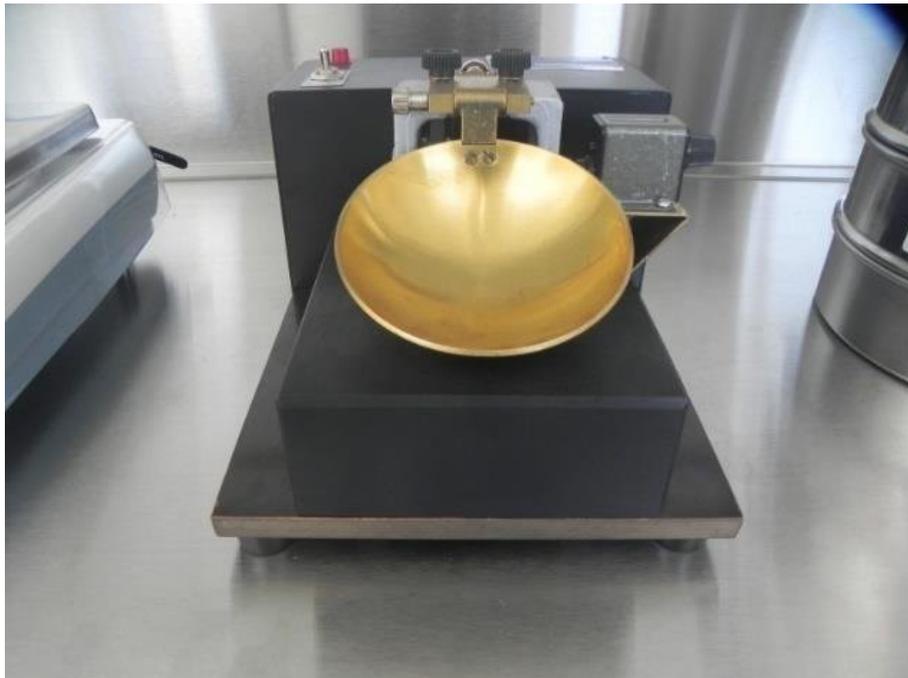
Para a caracterização física serão utilizados:

- Picnômetro;
- Estufa;
- Conjunto de peneiras e base vibratória;
- Almofariz e pistilo;
- Aparelho de Casagrande;
- Balança de precisão;
- Vidrarias diversas;
- Conjunto de formas metálicas;
- Gabarito cilíndrico para comparação.

Os ensaios de limites de Atterberg e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal em Fortaleza. O ensaio de massa específica por picnometria e o ensaio de umidade foram realizados no Laboratório de Geologia da Universidade Federal do Ceará em Crateús.

O aparelho de Casagrande é o dispositivo utilizado para a obtenção do limite de liquidez da argila. O mesmo é mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Autoria Própria

Para os ensaios de difração de raios X foi utilizado difratômetro para amostras policristalinas modelo DMAXB – Rigaku gerador de raios-X de 2k. Essa análise foi realizada no Laboratório de Raios X (LRX) do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará em Fortaleza.

4.4 Amostragem

De acordo com Santos (1989) os principais métodos de amostragem de argilas para estudos tecnológicos são:

- amostragem de jazidas ou depósitos;
- amostragem da argila bruta;
- amostragem de argila moída e acondicionadas em embalagens.

A amostragem de jazidas ou depósitos é realizada no local de deposição do material argiloso. Esse tipo de amostragem pode ser feita com dois objetivos principais que contemplam os casos da amostragem preliminar e amostragem extensiva. No primeiro caso, deseja-se obter informações prévias ou superficiais da argila estudada. O segundo caso é destinado a trabalhos voltados a cálculos sobre a extensão ou cubagem do depósito (SANTOS, 1989).

Como a extensão ou cubagem do depósito não foi o foco desse trabalho optou-se pela amostragem preliminar. A amostragem preliminar deve ser preferencialmente realizada em locais onde a argila está exposta ou muito próxima da superfície. Geralmente é feita em afloramentos ou barrancos e cortes de estradas. No caso do presente trabalho, a amostragem foi realizada em afloramentos e em pilhas criadas a partir do uso de escavadeiras. O procedimento utilizado para a coleta do material foi o seguinte:

- Análise prévia da área visando o reconhecimento de materiais distintos;
- Remoção da vegetação, rochas ou solo nos pontos onde foram coletadas as amostras (mais ou menos 10 kg por ponto);
- Cada amostra retirada foi ensacada, vedada e catalogada.

Ao todo foram coletadas 7 amostras em 6 pontos distintos com massa total de aproximadamente 70 kg.

4.5 Preparação e codificação das alíquotas

A preparação das amostras foi realizada de acordo com a ABNT 6457 (1986). Logo, as amostras foram submetidas a secagem ao ar livre por um período de 24 horas e posterior a secagem foram destorroadas em almofariz de porcelana com o auxílio do pistilo. Esse procedimento é mostrado a seguir na Figura 17.

Figura 17 – Destorroamento das argilas



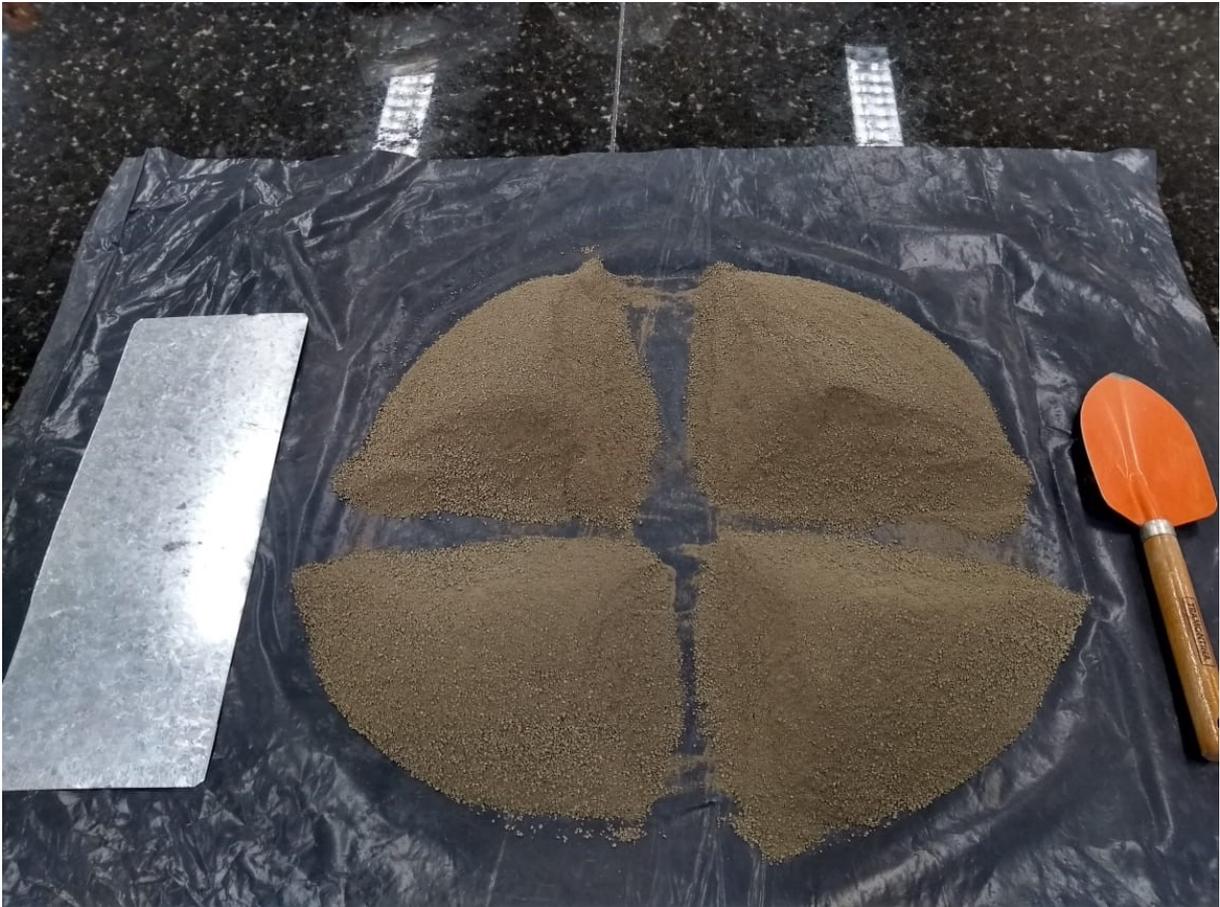
Fonte: Autoria Própria

Em seguida as amostras destorroadas foram homogeneizadas e quarteadas em pilha cônica, da forma sugerida por Sampaio *et al.* (2007), para retirada de alíquotas destinadas a caracterização física e mineralógica. Esse procedimento é mostrado na figura 18.

Com o final do quarteamento as amostras foram ensacadas e catalogadas para os ensaios de limites de Atterberg, massa específica por picnometria, umidade e análise granulométrica por sedimentação e peneiramento. Foram destinadas 14 alíquotas para o ensaio de massa específica, 14 alíquotas para o ensaio de umidade, 7 alíquotas para o ensaio de análise granulométrica, 7 alíquotas para o ensaio limites de Atterberg e 7 alíquotas para a difratometria

de raios X totalizando 49 alíquotas.

Figura 18 – Quarteamento das amostras de argilas



Fonte: Autoria Própria

4.6 Umidade

Para a realização do ensaio de umidade a argila coletada foi disposta em bandejas por um período de 24 horas ao ar livre. Com o fim da secagem prévia, a argila foi homogeneizada e quarteada em seguida as massas das alíquotas foram determinadas e as mesmas colocadas em estufa com temperatura de 105°C por um período de 24 horas visando atingir a constância da massa. Em seguida, as massas após a secagem em estufa, foram determinadas e a umidade calculada.

4.7 Massa específica por picnometria

Para a realização desse ensaio foi utilizada como referência a norma DNER 093 (1994) optou-se também pela utilização de duplicata.

Primeiramente a amostra foi seca em estufa por 24 horas em uma temperatura de 105 °C visando atingir a constância da massa. Em seguida, foram separadas 10 gramas de cada ponto para prosseguimento do ensaio. Posteriormente foram adotados os seguintes passos:

- Determinar a massa do picnômetro seco e limpo;
- Completar o volume do picnômetro com água até o transbordo, colocar a tampa, secar a parte externa cuidadosamente e determinar a massa do conjunto;
- Medir 10 g da amostra e seca-la em estufa;
- Transferir a amostra determinada e seca para o picnômetro limpo e seco determinar a massa do novo conjunto;
- Adicionar água até cobrir a amostra, agitando o picnômetro para eliminar as possíveis bolhas;
- Completar o volume do picnômetro até o transbordo novamente e secar a parte externa;
- Determinar a massa de todo o conjunto.

A massa específica é calculada pela equação 4.1 a seguir:

$$D = \frac{d(a - b)}{[(a - b) - (c - e)]} \quad (4.1)$$

- D: massa específica relativa da amostra;
- d: massa específica da água;
- a: massa do conjunto picnômetro + amostra seca (g);
- b: massa do picnômetro seco (g);
- c: massa do conjunto picnômetro + amostra seca + água desareada (g);
- e: massa do conjunto picnômetro + água desareada (g).

4.8 Limites de Atterberg

Para a determinação do Limite de Liquidez foi seguido o procedimento descrito por ABNT 6459 (1984). Após a calibragem do Aparelho de Casagrande, colocou-se a amostra numa cápsula de porcelana adicionando-se água destilada em pequenos incrementos e com uma espátula o conteúdo foi misturado para gerar uma massa homogênea.

Finalizada a homogeneização, parte da mistura foi adicionada e moldada na concha, em seguida a amostra de argila moldada foi dividida com o auxílio do cinzel de modo a gerar uma fenda. O resultado desse procedimento é mostrado na Figura 19.

Com todo o conjunto acoplado, golpes foram disferidos na concha com o auxílio da

Figura 19 – Amostra preparada para o ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Autoria Própria

manivela em uma frequência de dois golpes por segundo. Em seguida, foi anotado o número de golpes desferidos para fechar a fenda em um comprimento de aproximadamente 10 mm. Uma pequena porção do material localizada junto as bordas que se uniram foi transferida para um recipiente para que fosse calculada a sua umidade. O restante do material foi removido da concha sendo adicionado a um incremento de água e homogeneizado por 3 minutos, com o fim da homogeneização o material foi devolvido a concha de modo a se abrir uma nova fenda para aplicação de novos golpes. Esse procedimento foi repetido até a obtenção de 4 umidades.

Para a determinação do Limite de Plasticidade foi seguido o procedimento descrito pela ABNT 7180 (1981). Colocou-se a amostra numa cápsula de porcelana adicionando-se água destilada em pequenos incrementos e com uma espátula o conteúdo foi misturado para gerar uma massa homogênea com consistência plástica. Em seguida, 10 gramas da amostra foram separadas e moldadas com a palma da mão em formato de esfera, que foi rolada sobre uma placa de vidro com a intenção de se obter um cilindro com um raio de 3 mm e 100 mm de comprimento. O resultado desse procedimento é mostrado na Figura 20.

Os cilindros de argila em que não foram detectadas grandes ranhuras foram prepa-

Figura 20 – Amostra preparada para o ensaio de Limite de Liquidez



Fonte: Autoria Própria

rados para o cálculo da umidade. O procedimento foi repetido de modo a se obter mais duas umidades.

4.9 Análise granulométrica

Para a obtenção da curva granulométrica foi seguido o procedimento descrito em ABNT 7181 (1984). A amostra previamente preparada foi passada na peneira de 2 mm para a separação da fração grosseira da fina. Contudo, como a amostra era predominantemente argilosa não foi identificada fração grosseira.

Em seguida, 70 gramas de cada amostra foram destinadas ao peneiramento fino e a sedimentação. Para tal, as amostras foram colocadas em solução de hexametáfosfato por um período de 24 horas e em seguida foram colocadas no agitador mecânico por 15 minutos. Logo após o término da agitação as amostras foram colocadas em provetas de 1000 ml, sendo o volume completado com água destilada, e o densímetro foi colocado nos tempos de 30, 60, 120, 240, 460, 900, 1800, 3600, 7200, 14400, 28800 e 86400 segundos para a realização das leituras.

Com o fim da sedimentação, as amostras foram passadas na peneira de 0,074 mm com lavagem de água corrente por 5 minutos. O material retido foi colocado em estufa a 105°C por um período de 24 horas e submetido a peneiramento fino nas peneiras de 1.2, 0.6, 0.42, 0.25, 0.15 e 0.075 mm, os valores de massa retida foram anotados para a construção da curva granulométrica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Amostragem

Nos tópicos seguintes foi feita uma descrição sobre as características da argila e dos pontos amostrados.

5.1.1 Área 1

Após análise visual da área 1 a mesma foi dividida em três zonas onde a argila era semelhante. Dessa forma, foram coletadas três amostras distintas. A primeira amostra foi coletada em uma pilha formada pelo trabalho de uma escavadeira pertencente a empresa. Nesse ponto a argila apresentava uma coloração cinza escuro, como mostra a Figura 21, e para compor a amostra 1 foram removidos incrementos com o auxílio da pá e do martelo geológico.

Figura 21 – Características da argila no ponto 1



Fonte: Autorial Própria

A segunda amostra foi retirada da segunda zona discretizada. Nessa região a camada de argila apresentava uma coloração mais esbranquiçada, menor quantidade de matéria orgânica e foi possível perceber uma granulometria mais grosseira. Como a camada de argila encontrava-se próxima a superfície foi realizado um furo, com 20 a 30 cm de profundidade, por meio da boca de lobo e da pá. Foram retirados incrementos de argila até atingir uma camada arenosa localizada abaixo da argila. Esses aspectos são mostrados na Figura 22.

Figura 22 – Amostragem da argila no ponto 2



Fonte: Autoria Própria

A terceira amostra foi retirada da ultima zona definida pela análise visual, essa região encontrava-se em operação com o trabalho de uma escavadeira e dois caminhões. Logo, os incrementos para a composição da amostra foram retirados de uma pilha recém formada pela escavadeira. A argila dessa região apresentava uma coloração de cinza e amarelada com traços de material orgânico. A argila coletada é mostrada na Figura 23.

Figura 23 – Características da argila do ponto 3



Fonte: Autoria Própria

5.1.2 Área 2

No quarto ponto de amostragem foram retiradas duas amostras em locais próximos. A primeira foi amostrada em uma pilha feita a partir do trabalho de uma escavadeira e a segunda foi retirada de um furo (com 20 a 30 cm de profundidade) feito com auxílio de pá e da boca de lobo. Apesar de próximas, foi possível notar algumas diferenças entre as argilas nesse local. A argila retirada da pilha apresentava uma coloração mais escura e foi possível notar a presença de matéria orgânica na forma de galhos e gravetos. A argila retirada do furo apresentava uma cor mais amarelada e uma granulometria mais grosseira. A argila retirada da pilha e a argila retirada do furo são mostradas na Figura 24.

Figura 24 – Características da argila amostrada no ponto 4 (Pilha e furo)



Fonte: Autoria Própria

No ponto de amostragem de número 5 a argila foi coletada de um barranco escavado pelo trabalho de uma escavadeira. A argila desse ponto apresentava uma consistência arenosa, coloração bege esbranquecida e traços de matéria orgânica. Essas características são mostradas na Figura 25.

Figura 25 – Características da argila coletada no ponto 5



Fonte: Autoria Própria

Por fim, a argila coletada no ponto 6 apresentava uma granulometria muito fina, uma coloração acinzentada, elevada plasticidade quando em contato com água e não foram detectados traços de matéria orgânica. Nesse ponto a argila foi coletada por meio de um furo, com 10 a 15 cm de profundidade, que é mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Argila coletada no ponto 6



Fonte: Autoria Própria

5.2 Caracterização física

5.2.1 Umidade e massa específica por picnômetro

A nomenclatura para as amostras utilizada nesse ensaio é composta pela letra A (amostra), seguida de um número que especifica o ponto de amostragem e por fim uma letra P ou uma letra D com a intenção de distinguir a amostra principal da duplicata. As Tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios de umidade e massa específica por picnômetro.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de umidade

Amostra	Cápsula (g)	Amostra + Cápsula (g)		Umidade	Média
		Seca ao ar livre (24 h)	Seca em estufa (105°C por 24 h)		
A1 - P	12,87	56,41	53,56	6,55%	6,59%
A1 - D	13,15	58,31	55,31	6,64%	
A2 - P	14,09	64,3	63,43	1,73%	1,84%
A2 - D	14,63	64,49	63,52	1,95%	
A3 - P	56,18	103,15	100,78	5,05%	5,04%
A3 - D	55,78	106,23	103,69	5,03%	
A4.1 - P	71,9	122,12	119,83	4,56%	4,49%
A4.1 - D	40,1	90,17	87,96	4,41%	
A4.2 - P	68,31	115,58	114,72	1,82%	1,76%
A4.2 - D	70,14	120,18	119,33	1,70%	
A5 - P	51,03	87,49	86,37	3,07%	3,04%
A5 - D	45,97	86,52	85,3	3,01%	
A6 - P	45,08	108,08	103,38	7,46%	7,44%
A6 - D	50,79	102,6	98,76	7,41%	

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 – Resultados do ensaio de massa específica por picnômetro

	P1	P2	P3	P4	Massa específica	Média
(A1 - P)	47,37	54,17	161,03	156,93	2,519	2,554
(A1 - D)	47,43	54,86	161,48	156,92	2,589	
(A2 - P)	47,43	54,69	161,43	156,94	2,621	2,632
(A2 - D)	47,51	55,57	161,93	156,92	2,643	
(A3 - P)	47,49	55,17	161,58	156,95	2,518	2,525
(A3 - D)	47,42	54,18	161,03	156,94	2,532	
A4.1 - P	47,48	56,21	162,18	156,92	2,516	2,470
A4.1 - D	47,57	56,25	162	156,9	2,425	
A4.2 - P	47,45	55,24	161,71	156,93	2,588	2,432
A4.2 - D	47,42	53,04	160,05	156,9	2,275	
A5 - P	47,42	55,62	161,95	156,93	2,579	2,525
A5 - D	47,56	56,53	162,27	156,93	2,471	
A6 - P	47,49	55,22	160,87	156,89	2,061	2,174
A6 - D	47,55	53,63	160,31	156,89	2,286	

Fonte: Autoria Própria

As amostras A1 e A6 obtiveram os maiores valores de umidade dentre todas as amostras ensaiadas. Esses elevados valores podem estar relacionados a vários fatores como distribuição granulométrica, associação mineralógica e disponibilidade de água no local de deposição da argila. Em especial para a amostra A6, durante a fase de amostragem foi notada uma granulometria fina, alta plasticidade e o local estava mais saturado em água se comparada ao restante dos pontos de amostragem.

Com exceção da amostra A6, as massas específicas das demais amostras ficaram dentro dos limites esperados para materiais silicatados. No caso da amostra A6, o seu baixo valor de massa específica pode estar relacionado a composição mineralógica.

5.2.2 Limite de liquidez e limite de plasticidade

Para a obtenção dos valores de limite de liquidez foi traçado um gráfico com as umidades referentes a cada incremento das amostras versus o número de golpes desferidos na concha do Aparelho de Casagrande. Em seguida, é ajustada uma reta através dos pontos obtidos sendo aceito como limite de liquidez o valor inteiro mais próximo da umidade referente a 25 golpes. Os gráficos e tabelas referentes as amostras A1, A3, A4.1, A4.2, A5, A6 são mostradas no Apêndice A. A seguir é apresentado um resumo dos resultados na Tabela 4, assim como a classificação elaborada por Macedo *et al.* (2008), que sugere os valores ideais para o Limite de Liquidez em materiais argilosos visando a sua utilização na fabricação de blocos cerâmicos.

Tabela 4 – Resumo dos resultados de limite de liquidez

Amostra	Limite de liquidez	Macedo <i>et al.</i> (2008) (30-60%)
A1	33%	Atende a classificação
A2	-	-
A3	25%	Abaixo do valor mínimo
A4.1	31%	Atende a classificação
A4.2	-	-
A5	25%	Abaixo do valor mínimo
A6	39%	Atende a classificação

Fonte: Autoria Própria

O gráfico para a amostra A2 não pôde ser construído, pois não apresentou plasticidade suficiente, já que a ranhura fechou no primeiro golpe na concha. Apesar do gráfico da amostra A4.2 ter sido construído não foi possível obter o valor correspondente ao número de 25 golpes, portanto, conforme orienta a ABNT 6459 (1984), o seu valor não pode ser inferido.

As amostras A3 e A5 obtiveram valores menores que o valor mínimo estabelecido

pela classificação considerada. Logo, essas amostras apresentam liquidez insuficiente para um processo de conformação adequado.

Para a obtenção do limite de plasticidade foram construídas tabelas com as umidades obtidas durante os ensaios, sendo o limite de plasticidade o valor da média aritmética das umidades encontradas. As tabelas referentes as amostras A1, A3, A4.1, A4.2, A5, A6 são mostradas no Apêndice B. A Tabela 5 mostra um resumo dos resultados, assim como a classificação apresentada por Macedo *et al.* (2008) que sugere os valores ideais para o Limite de Plasticidade em materiais argilosos visando a sua utilização na fabricação de blocos cerâmicos.

Tabela 5 – Resumo dos resultados do limite de plasticidade

Amostra	Limite de plasticidade	Macedo <i>et al.</i> (2008) (15-30%)
A1	17,79%	Atende a classificação
A2	-	-
A3	14,07%	Abaixo do valor mínimo
A4.1	18,70%	Atende a classificação
A4.2	12,52%	Abaixo do valor mínimo
A5	14,07%	Abaixo do valor mínimo
A6	20,09%	Atende a classificação

Fonte: Autoria Própria

As amostras A3, A4.2 e A5 obtiveram valores menores que o mínimo estabelecido pela classificação considerada. Logo, essas amostras não apresentaram a plasticidade adequada para a confecção de peças cerâmicas.

E por fim, o índice de plasticidade é obtido fazendo a subtração do limite de liquidez pelo limite de plasticidade. Na Tabela 6 são mostrados os resultados para o índice de plasticidade bem como a classificação apresentada por Macedo *et al.* (2008) que sugere os valores ideais para o Índice de Plasticidade em materiais argilosos visando a sua utilização na fabricação de blocos cerâmicos.

Tabela 6 – Resumo dos resultados do índice de plasticidade

Amostra	Índice de plasticidade	Macedo <i>et al.</i> (2008) (10-30%)
A1	15,21%	Atende a classificação
A2	-	-
A3	10,93%	Atende a classificação
A4.1	12,30%	Atende a classificação
A4.2	-	-
A5	10,93%	Atende a classificação
A6	18,91%	Atende a classificação

Fonte: Autoria Própria

Todas as amostras se encontram dentro dos limites estabelecidos pela classificação. Contudo, as amostras A3 e A5 apresentam valores próximos a 10%, sendo assim é esperado grandes alterações na consistência da argila para pequenas variações no teor de umidade o que é prejudicial para o processo produtivo.

5.2.3 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

Para a obtenção dos resultados foram construídos gráficos de distribuição granulométrica contendo com os valores obtidos nos ensaios de peneiramento e sedimentação. No apêndice C são mostrados os gráficos construídos. Na Tabela 7 é apresentado o fracionamento das amostras de acordo com a classificação recomendada pela ABNT 7181 (1984).

Tabela 7 – Fracionamento e classificação das amostras

Fração	A1	A2	A3	A4.1	A4.2	A5	A6
Pedregulho	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Areia Grossa	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Areia Média	9%	1%	2%	2%	36%	11%	3%
Areia Fina	49%	18%	46%	26%	40%	48%	20%
Silte	18%	23%	17%	20%	4%	8%	15%
Argila	22%	58%	35%	52%	20%	33%	62%

Fonte: Autoria Própria

Os resultados baseados na classificação do Diagrama de Winkler são mostrados na Tabela 8, bem como as faixas granulométricas consideradas.

Tabela 8 – Fracionamento e classificação das amostras.

Amostras	Composição granulométrica (%)		
	2 μm	2 a 20 μm	20 μm
A1	9	6	85
A2	49	26	25
A3	28	18	54
A4.1	48	18	34
A4.2	18	4	78
A5	29	8	63
A6	62	8	30

Fonte: Autoria Própria

Como esperado, a maior porcentagem das amostras está situada nas frações mais finas (areia fina, silte e argila). Somente a amostra A1 apresentou uma porcentagem mais grosseira do fracionamento (areia grossa). A amostra A6 obteve o maior valor relacionado a

fração argila (62%) o que vai de acordo com o seu elevado Índice de plasticidade (18,91%). A amostra A4.2 obteve o menor valor para a fração argila (20%) o que está de acordo com o seu baixo Índice de plasticidade (10,93%).

Para a classificação baseada no Diagrama de Winkler, os usos indicados para cada amostra dependendo da finalidade do uso e da porcentagem das frações obtidas é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação baseada no Diagrama de Winkler.

Produtos	<(2μm)	(2 a 20μm)	>(20μm)
A. Materiais de qualidade com dificuldade de produção	A2, A4.1	A2	A2, A6
B. Telhas, capas	-	A2	A2; A6
C. Tijolos furados	A3, A5	A2	A2; A4.1, A6
D. Tijolos maciços	A4.2	A2	A2, A3, A4.1, A6

Fonte: Autoria Própria

A amostra A2 obteve o melhor desempenho sendo recomendada a sua utilização para todos os produtos na composição de 2 a 20 μ m e superior a 20 μ m. A amostra A2 também se mostrou adequada para todas as composições dos produtos da categoria A.

Para a composição superior a 20 μ m a amostra A6 é adequada para todos os produtos. Contudo, nenhuma das amostras é recomendada para todos os produtos independente da fração sendo necessária a blendagem entre as composições para se obter o produto com as propriedades mínimas exigidas.

5.3 Difração de raios X

Um resumo dos resultados da análise por difratometria de raios X são mostradas na Tabela 10 a seguir, enquanto os difratogramas são apresentados no Apêndice D.

Tabela 10 – Associações minerais nas amostras.

Amostra	Associação mineralógica
A1	Quartzo, Albita, Caulinita e Ortoclásio
A2	Quartzo, Albita, Ilita, Ortoclásio e Caulinita
A3	Quartzo, Albita, Ilita, Ortoclásio e Caulinita
A4.1	Quartzo, Albita, Ilita, Ortoclásio e Caulinita
A4.2	Quartzo, Albita, Muscovita, Caulinita, Ilita e Vermiculita
A5	Quartzo, Caulinita, Vermiculita, Albita e Clorita
A6	Quartzo, Caulinita, Albita, Vermiculita e Montmorilonita

Fonte: Autoria Própria

Em todas as amostras foi detectada a presença do mineral quartzo e minerais do grupo

dos feldspatos, portando minerais da família dos silicatos o que vai de encontro com as massas específicas encontradas com a técnica de picnometria. Em todas as amostras foi encontrado o mineral caulinita contudo, somente na amostra A6 foi encontrado o mineral montmorilonita o que pode estar relacionado a sua elevada plasticidade.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados foi possível fazer as seguintes conclusões:

- Os valores encontrados para as massas específicas das amostras A1, A2, A3, A4.1, A4.2 e A5 ficaram restritos ao intervalo de 2,525 à 2,632 g/cm³. A amostra A6 apresentou uma massa específica de 2,174 g/cm³ o que pode estar relacionado a presença do mineral montmorilonita;
- Para os ensaios de Limite de Atterberg as amostras A1, A4.1 e A6 apresentaram resultados adequados a confecção de blocos cerâmicos no que diz respeito a plasticidade e liquidez necessárias. A amostra A2 não apresentou plasticidade suficiente para realização dos ensaios, logo possivelmente por ser usada como reguladora de plasticidade visando a mistura e adequação de outras amostras;
- Com relação a análise granulométrica, as maiores porcentagens das amostras ficaram situadas nas porções mais finas da classificação considerada (areia fina, silte e argila). As amostras A2 e A6 apresentaram os melhores resultados visando a confecção de peças cerâmicas;
- Nenhuma das amostras isoladamente se mostrou adequada para a confecção de peças cerâmicas, visto que nenhuma das amostras atendeu aos critérios de todas as classificações, visando um processo otimizado. Logo, a mistura entre as argilas pode gerar materiais mais adequados;
- Para o ensaio de difratometria de raios X, foram encontrados os minerais quartzo, albita, ortoclásio e muscovita e argilominerais comuns na maioria das argilas ilita, caulinita, vermiculita e montmorilonita. O mineral montmorilonita foi encontrado somente na amostra A6 o que pode estar relacionado a sua elevada plasticidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT 6457. **NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** [S. l.]: ABNT, 1986.
- ABNT 6459. **NBR 6459: Solo-Determinação do limite de liquidez.** [S. l.]: ABNT Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT 6502. **NBR 6502: Rochas e Solo.** [S. l.]: ABNT, 1995.
- ABNT 7180. **NBR 7180: Solo-Determinação do limite de plasticidade.** [S. l.]: ABNT, 1981.
- ABNT 7181. **NBR 7181: Solo-Análise Granulométrica.** [S. l.]: ABNT, 1984.
- ALBERS, A. *et al.* **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X.** *Cerâmica [online]*. 2002, vol. 48, n. 305. [S. l.]: SciELO Brasil, 2002.
- ALMEIDA, F. D.; HASUI, Y.; NEVES, B. de B.; FUCK, R. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 17, n. 1-2, p. 1–29, 1981.
- AMPIAN, S. G. **Clays.** [S. l.]: Department of the Interior, Bureau of Mines, 1979.
- ANCELMI, M. F.; SANTOS, T. J. S. dos; REGINATO, R. A.; AMARAL, W. da S.; MONTEIRO, L. V. S. Geologia da faixa eclogítica de forquilha, domínio ceará central, noroeste da província borborema. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 2, p. 235–252, 2013.
- ARTHAUD, M.; CABY, R.; FUCK, R.; DANTAS, E.; PARENTE, C. Geology of the northern borborema province, ne brazil and its correlation with nigeria, nw africa. **Geological Society, London, Special Publications**, Geological Society of London, v. 294, n. 1, p. 49–67, 2008.
- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de Química-: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente.** [S. l.]: Bookman Editora, 2018.
- BAUER, F. L. **Materiais de construção. revisada.** Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- BRAGA, W. A.; BRANDÃO, F. da S.; SANTOS, M. W. L. C. dos; SALES, J. C. A informalidade na indústria de cerâmica vermelha - estudo de caso - fábrica em hidrolândia-ce. In: **CONGRESSO TECNICO CIENTIFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA.** Teresina, Brasil: [S. n.], 2014. p. 14.
- BRASIL. Ministério de meio ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba,** MMA. Brasilia., 2006.
- BRASIL. Agência nacional de mineração. **Anuário Mineral do Ceará,** ANM. Brasilia., 2018.
- BRASIL. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **Solos Brasileiros,** EMBRAPA. Brasilia., 2020.
- CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução .** [S. l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- CEARÁ. Secretária de planejamento e gestão. **Perfil Básico Municipal: Crateús,** Fortaleza, CE., 2009.

- CEARÁ. Secretária de planejamento e gestão. **As Regiões de Planejamento do Estado do Ceará**, Fortaleza, CE., 2015.
- COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. d. S.; SANTOS, H. d. S. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 146–152, 2007.
- COSTA, F. G. d. **Geologia e recursos minerais da folha Crateús: SB. 24-VC-III**. [S. l.], 2017.
- DAS, B. M. *et al.* Fundamentos de engenharia geotécnica. Thomson Learning S. Paulo, SP, 2007.
- DIÁRIO DO NORDESTE. **Ceará é o 5° do País em empresas ceramistas**. 2014. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/negocios/ceara-e-o-5-do-pais-em-empresas-ceramistas-1.1134275>. Acesso em: 02 abr. 2020.
- DNER 093. **DNER 093: Solos - Determinação da densidade rea**. [S. l.]: DNER, 1994.
- EMBRAPA. **Solos Brasileiros**. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 02 abr. 2020.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para Entender a Terra-6**. [S. l.]: Bookman Editora, 2013.
- GUINIER, A. **X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals, and amorphous bodies**. [S. l.]: Courier Corporation, 1994.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física Vol. 2**. [S. l.]: Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2009.
- KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. [S. l.]: Bookman Editora, 2009.
- LARACH, J.; CAMARGO, M.; JACOMINE, P.; CARVALHO, A. de; SANTOS, H. dos. Definição e notação de horizontes e camadas do solo. **Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E)**, Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1988., 1988.
- MACEDO, R.; MENEZES, R.; NEVES, G.; FERREIRA, H. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 54, n. 332, p. 411–417, 2008.
- MACKENZIE, R. The classification and nomenclature of clay minerals. **Clay Minerals Bulletin**, Citeseer, v. 4, n. 21, p. 52–66, 1959.
- MENEZES, R.; NEVES, G.; FERREIRA, H. Mapeamento de argilas do estado da paraíba. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 47, n. 302, p. 77–81, 2001.
- MORAIS, D. d.; SPOSTO, R. M. Propriedades tecnológicas e mineralógicas das argilas e suas influências na qualidade de blocos cerâmicos de vedação que abastecem o mercado do distrito federal. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 5-6, p. 35–38, 2006.
- OBAJE, S.; OMADA, J.; DAMBATTÀ, U. Clays and their industrial applications: Synoptic review. **International Journal of Science and Technology**, Citeseer, v. 3, n. 5, p. 264–270, 2013.
- O'BANNON, L. **Dictionary of ceramic science and engineering**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

- PINTO, C. d. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. [S. l.]: São Paulo: Oficina de Textos, 2006. v. 3.
- PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1/2, p. 31–35, 1997.
- SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. [S. l.]: CETEM/MCT, 2007.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. D.; OLIVEIRA, V. D.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. D.; FILHO, J. de A.; OLIVEIRA, J. D.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.
- SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas, 2 a Edição, Vol. 1, Editora Edgard Blücher Ltda**. [S. l.: s. n.], 1989. 282–283 p.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais. 6ª edição**. [S. l.]: Pearson. São Paulo, 2008.
- SILVA, A.; FERREIRA, H. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3, n. 2, p. 26–35, 2008.
- TEIXEIRA, P. G. F.; COTA, T. G. Argilas do estado do ceará: principais características e aplicações. In: **FORUM REGIONAL DE MINERAÇÃO**. Recife, Brasil: [S. n.], 2019. p. 7.
- VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. d. **Introdução ao tratamento de minérios**. [S. l.]: Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- VIDAL, F. W. H.; SALES, F. A. C. B.; SOUSA, J. F. d.; MATTOS, I. C. **Rochas e minerais industriais do Estado do Ceará**. [S. l.]: CETEM/UECE/DNPM/FUNCAP/SENAI, 2005.

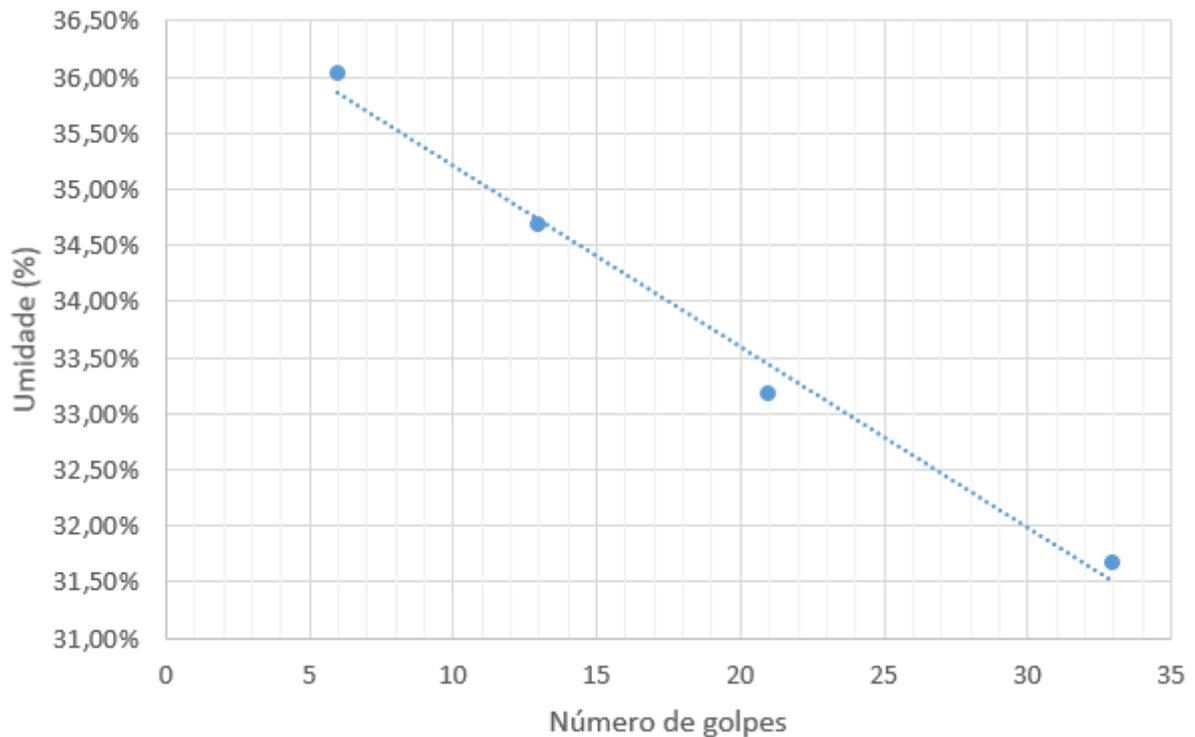
APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ PARA AS AMOSTRAS A1, A3, A4.1, A4.2, A5 E A6.

Tabela 11 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A1.

Limite de liquidez – A1				
Golpes	33	21	13	6
Tara da cap.	6,78	6,06	6,25	6,31
Peso úmido	16,57	16,97	15,19	16,19
Peso seco	13,47	13,35	12,09	12,63
Umidade (%)	31,66%	33,18%	34,68%	36,03%

Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Determinação do limite de liquidez para amostra A1



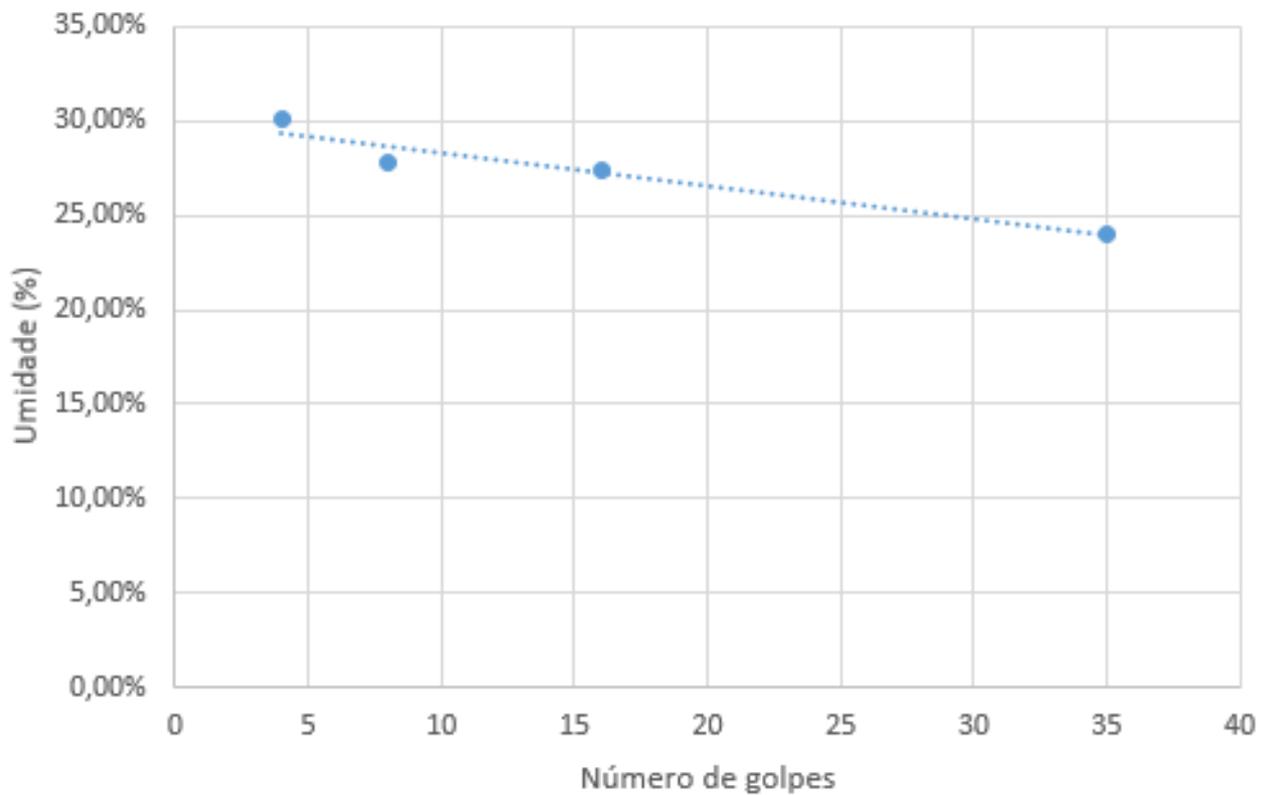
Fonte: Autoria Própria

Tabela 12 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A3.

Limite de liquidez – A3				
Golpes	35	16	8	4
Tara da cap.	6,53	6,29	6,06	5,25
Peso úmido	18,32	19,42	19,87	19,31
Peso seco	15,49	15,82	16,03	15,08
Umidade (%)	24,00%	27,42%	27,81%	30,09%

Fonte: Autoria Própria

Figura 28 – Determinação do limite de liquidez para amostra A3



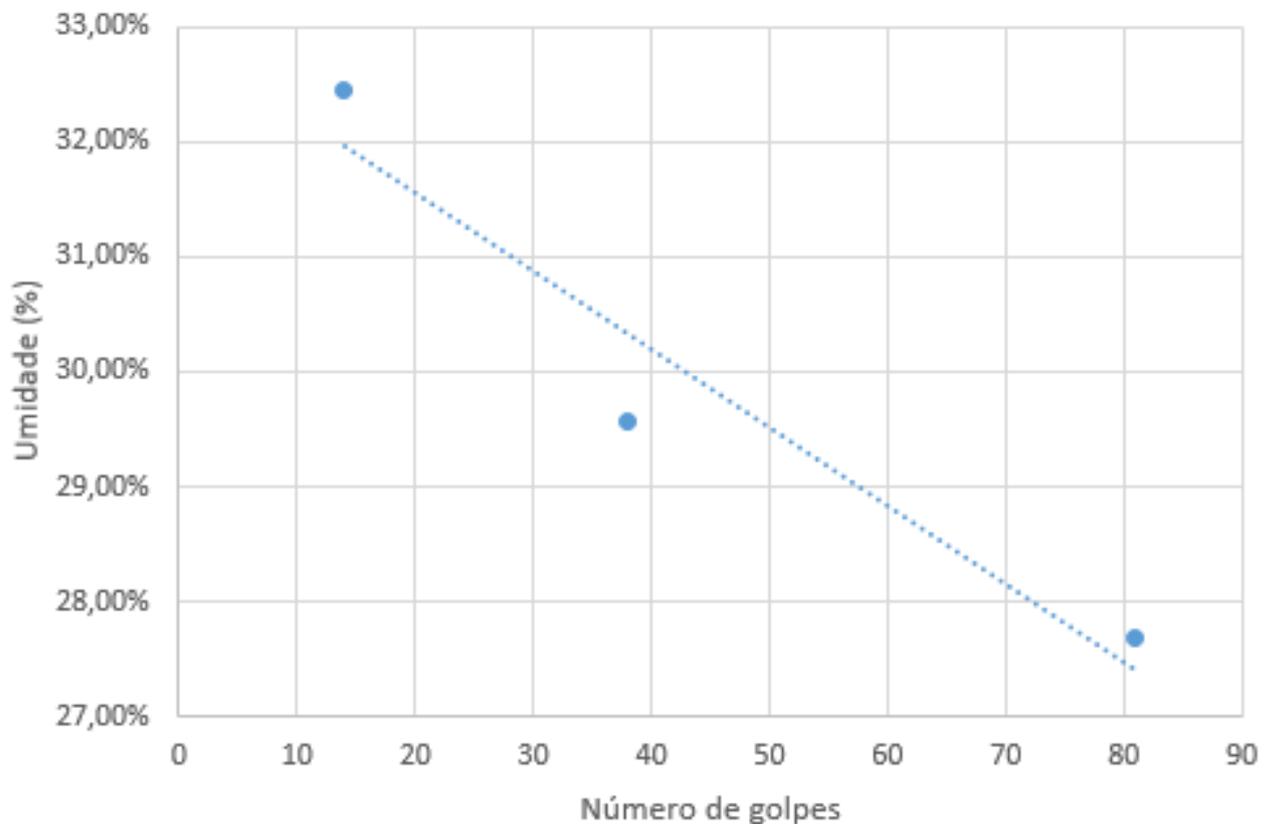
Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A4.1.

Limite de liquidez – A4.1			
Golpes	81	38	14
Tara da cap.	6,48	6,1	6,83
Peso úmido	24	22,88	21,47
Peso seco	19,15	17,92	16,72
Umidade (%)	27,68%	29,56%	32,45%

Fonte: Autoria Própria

Figura 29 – Determinação do limite de liquidez para amostra A4.1



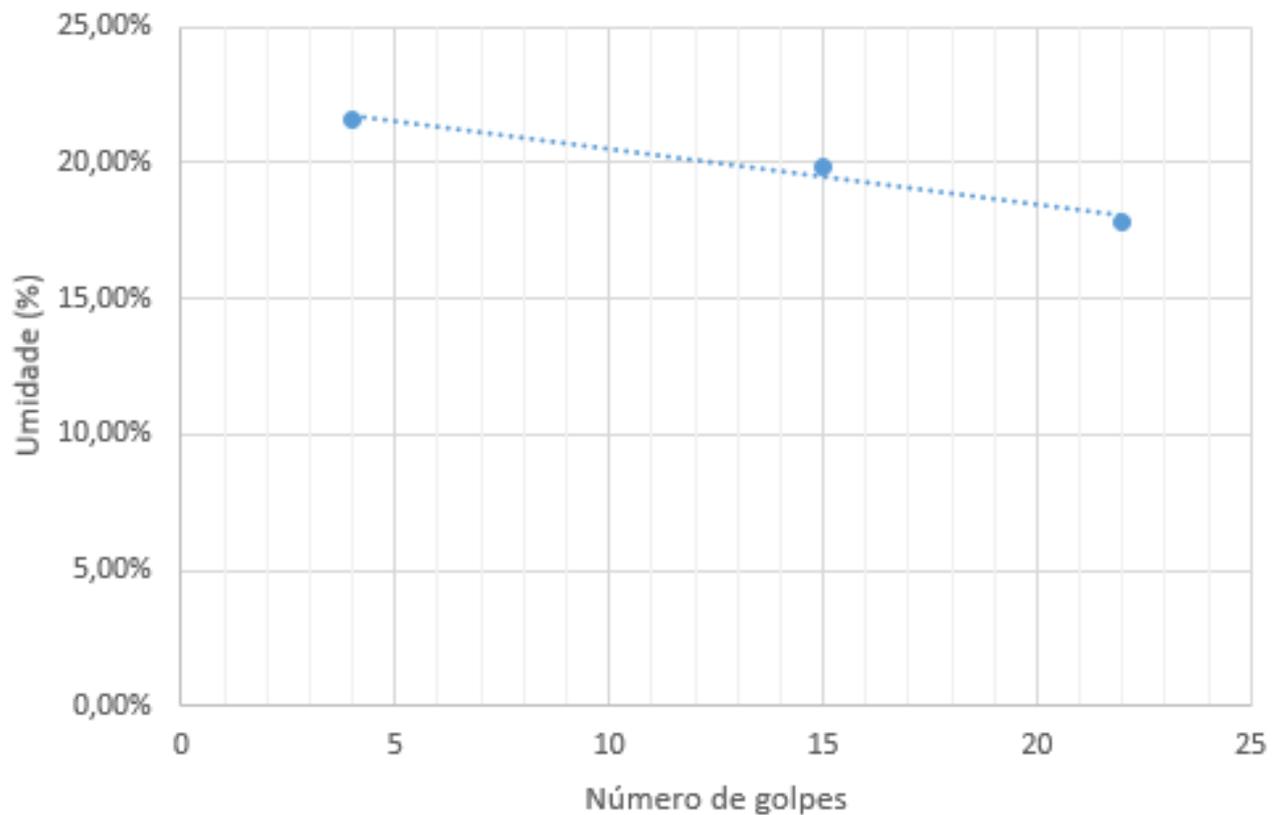
Fonte: Autoria Própria

Tabela 14 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A4.2.

Limite de liquidez – A4.2			
Golpes	22	15	4
Tara da cap.	7,13	5,94	6,59
Peso úmido	24,96	22,05	19,63
Peso seco	21,78	18,85	16,81
Umidade (%)	17,84%	19,86%	21,63%

Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Determinação do limite de liquidez para amostra A4.2



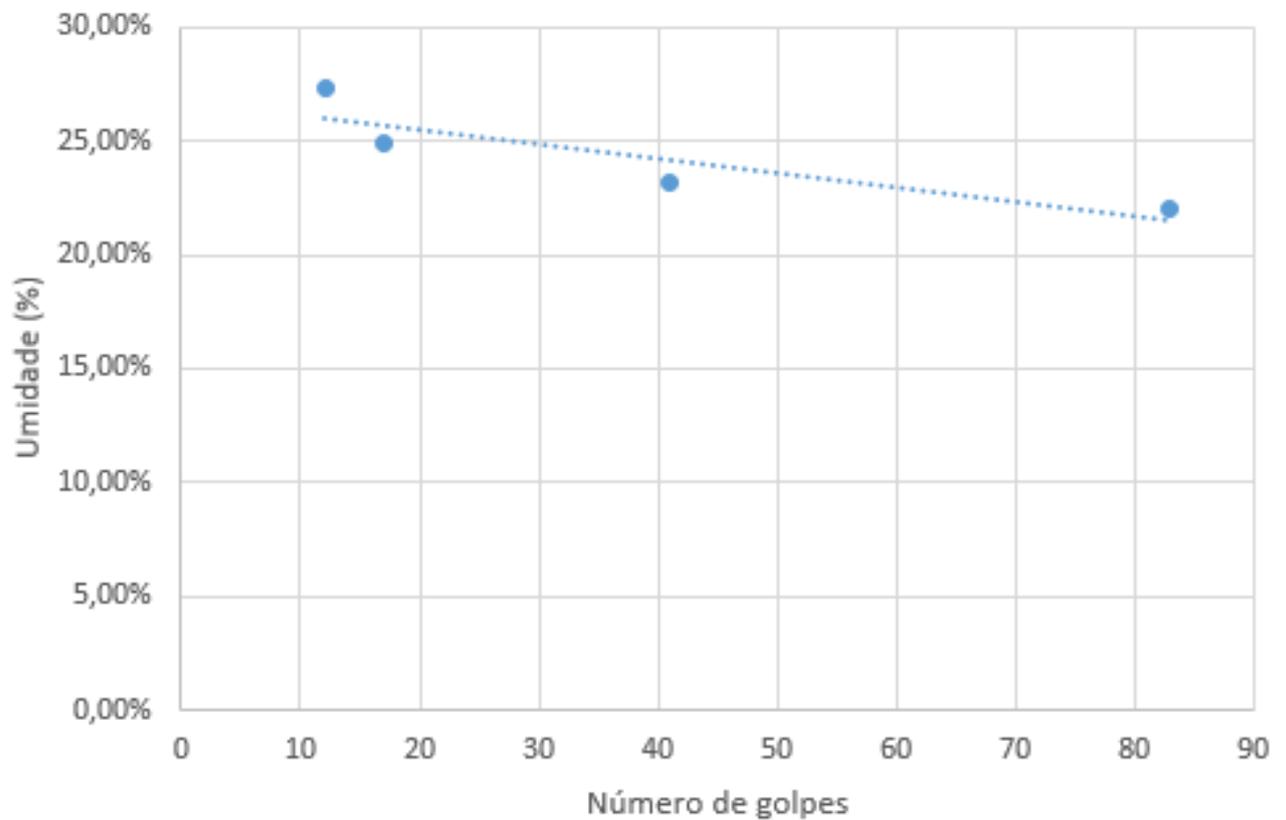
Fonte: Autoria Própria

Tabela 15 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A5.

Limite de liquidez – A5				
Golpes	83	41	17	12
Tara da cap.	6,18	6,19	5,99	6,36
Peso úmido	18,78	20,62	23,49	20,74
Peso seco	16,01	17,28	19,13	16,82
Umidade (%)	21,98%	23,15%	24,91%	27%

Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Determinação do limite de liquidez para amostra A5



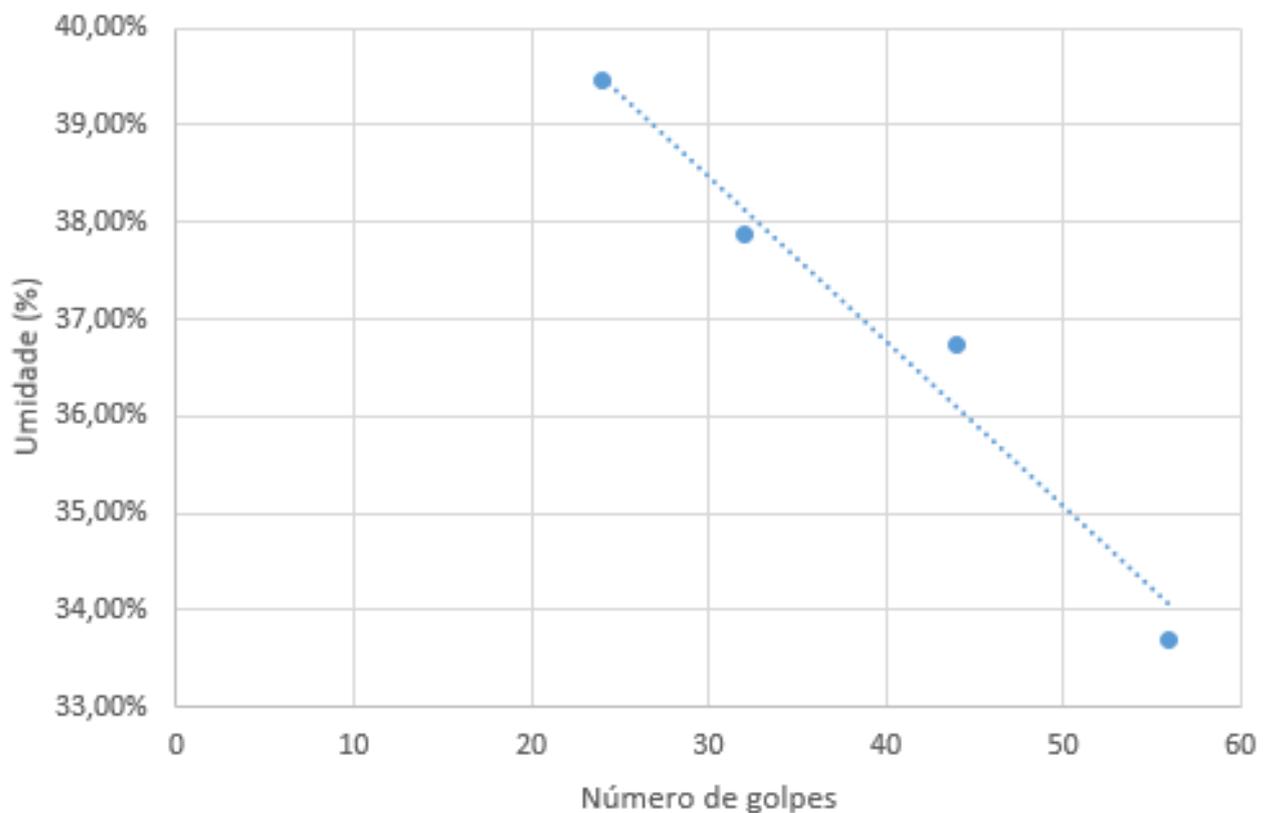
Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 – Resultado do ensaio de limite de liquidez para a amostra A6.

Limite de liquidez – A6				
Golpes	56	44	32	24
Tara da cap.	6,78	6,54	6,01	6,32
Peso úmido	20,16	19,47	20,48	19,85
Peso seco	15,65	14,72	15	14,51
Umidade (%)	33,71%	36,74%	37,87%	39%

Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Determinação do limite de liquidez para amostra A6



Fonte: Autoria Própria

**APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE
PARA AS AMOSTRAS A1, A3, A4.1, A4.2, A5 E A6.**

Tabela 17 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A1.

Limite de plasticidade – A1				
Tara da cap.	6,5	6,46	6,02	5,97
Peso úmido	8,68	8,31	8,1	8,07
Peso seco	8,28	7,97	7,75	7,7
Umidade (%)	18,35%	18,38%	16,83%	17,62%
Média	17,79%			
Desvio	0,56%	0,59%	0,97%	0,17%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A3.

Limite de plasticidade – A3				
Tara da cap.	6,33	6,76	5,67	6,11
Peso úmido	7,21	7,91	7,04	7,36
Peso seco	7,08	7,73	6,85	7,21
Umidade (%)	14,77%	15,65%	13,87%	12,00%
Média	14,07%			
Desvio	3,02%	2,14%	3,92%	5,79%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A4.1.

Limite de plasticidade – A4.1				
Tara da cap.	5,95	6,08	6,27	6,08
Peso úmido	7,73	8	8,13	7,6
Peso seco	7,38	7,6	7,81	7,34
Umidade (%)	19,66%	20,83%	17,20%	17,11%
Média	18,70%			
Desvio	1,87%	3,04%	0,59%	0,69%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A4.2.

Limite de plasticidade – A4.2				
Tara da cap.	7,15	6,36	6,26	6,29
Peso úmido	9,23	7,98	8,46	8,65
Peso seco	8,97	7,79	8,18	8,34
Umidade (%)	12,50%	11,73%	12,73%	13,14%
Média	12,52%			
Desvio	5,29%	6,06%	5,07%	4,66%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A5.

Limite de plasticidade – A5				
Tara da cap.	5,73	5,99	5,75	6,37
Peso úmido	7,55	7,93	7,97	7,7
Peso seco	7,31	7,63	7,64	7,53
Umidade (%)	13,19%	15,46%	14,86%	12,78%
Média	14,07%			
Desvio	4,61%	2,33%	2,93%	5,01%

Fonte: Autoria própria.

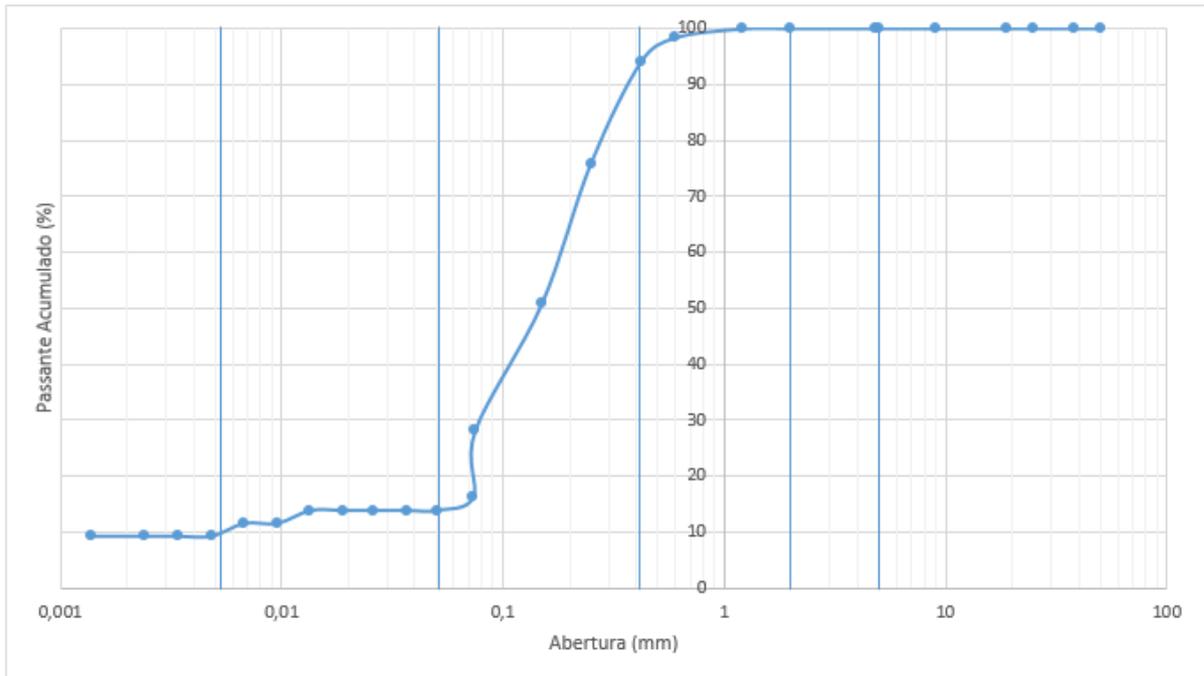
Tabela 22 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade para a amostra A6.

Limite de plasticidade – A6				
Tara da cap.	6,12	6,46	5,66	6,25
Peso úmido	8,48	9,37	7,74	8,7
Peso seco	7,99	8,81	7,3	8,23
Umidade (%)	20,76%	19,24%	21,15%	19,18%
Média	20,09%			
Desvio	2,97%	1,45%	3,36%	1,39%

Fonte: Autoria própria.

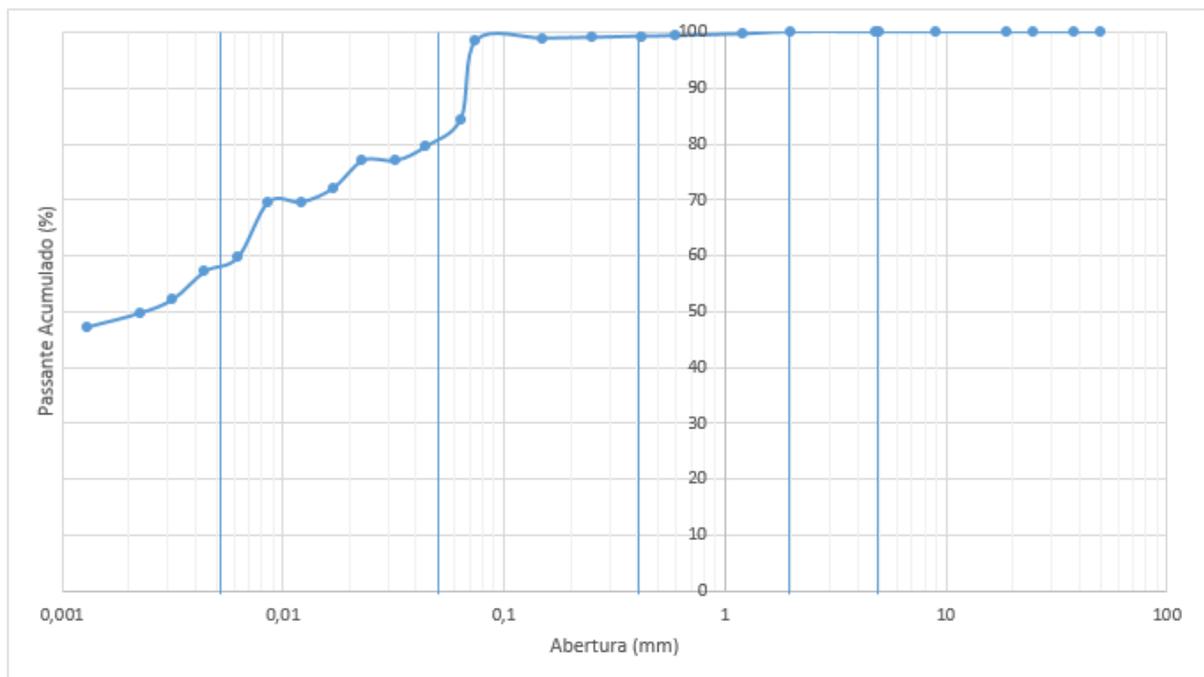
**APÊNDICE C – GRÁFICOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA PARA AS
AMOSTRAS A1, A2, A3, A4.1, A4.2, A5 E A6.**

Figura 33 – Curva de análise granulométrica para a amostra A1



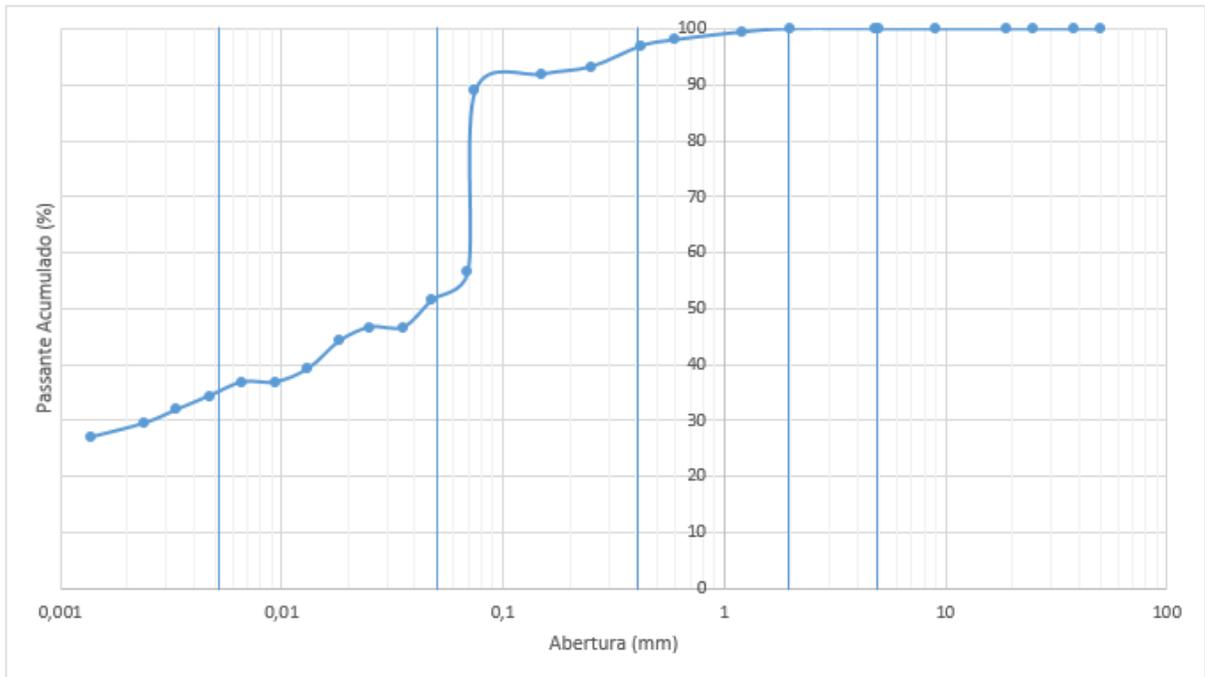
Fonte: Autoria Própria

Figura 34 – Curva de análise granulométrica para a amostra A2



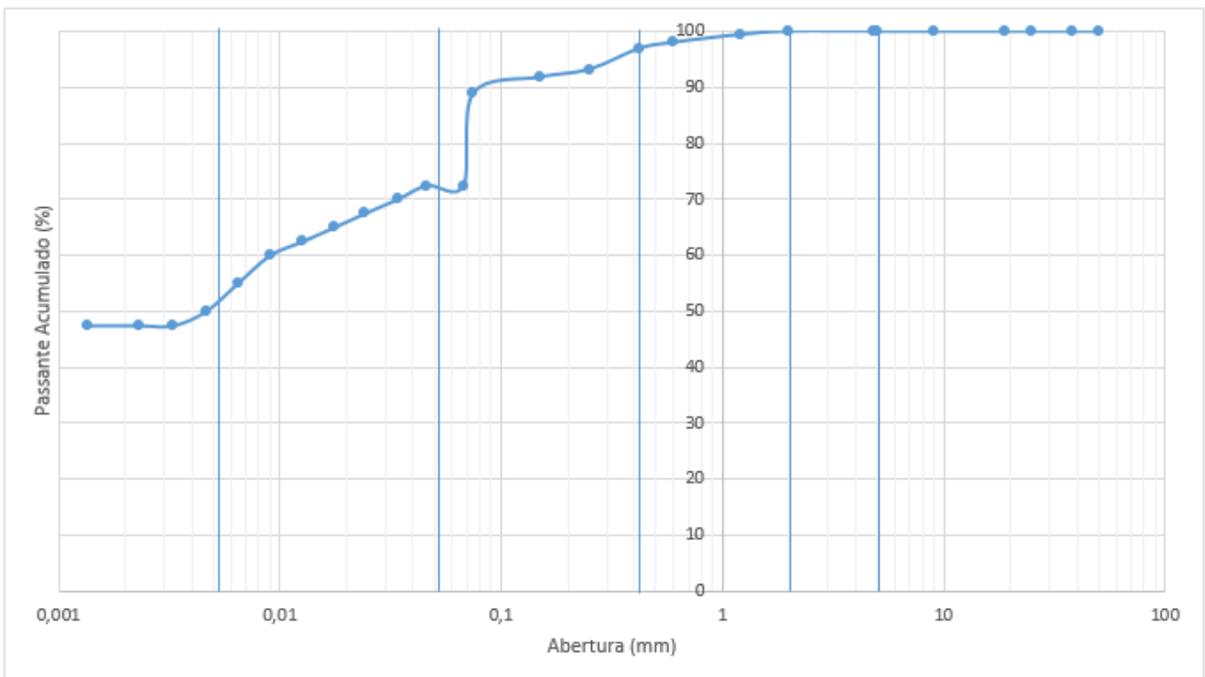
Fonte: Autoria Própria

Figura 35 – Curva de análise granulométrica para a amostra A3



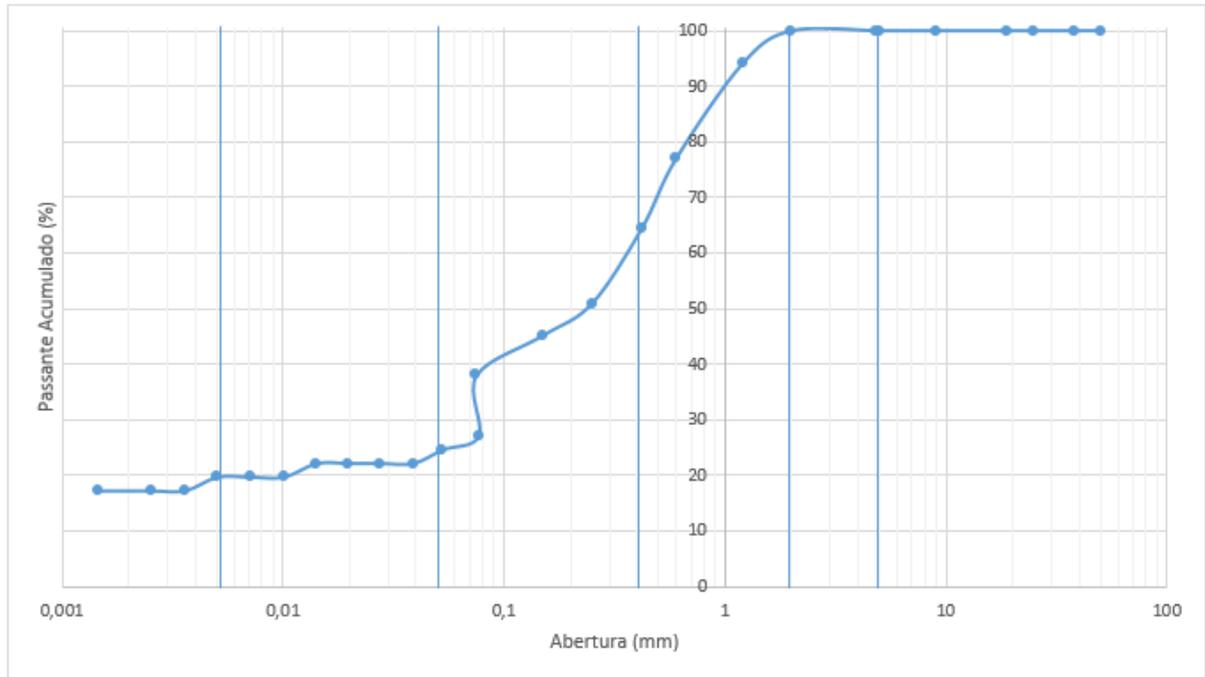
Fonte: Autoria Própria

Figura 36 – Curva de análise granulométrica para a amostra A4.1



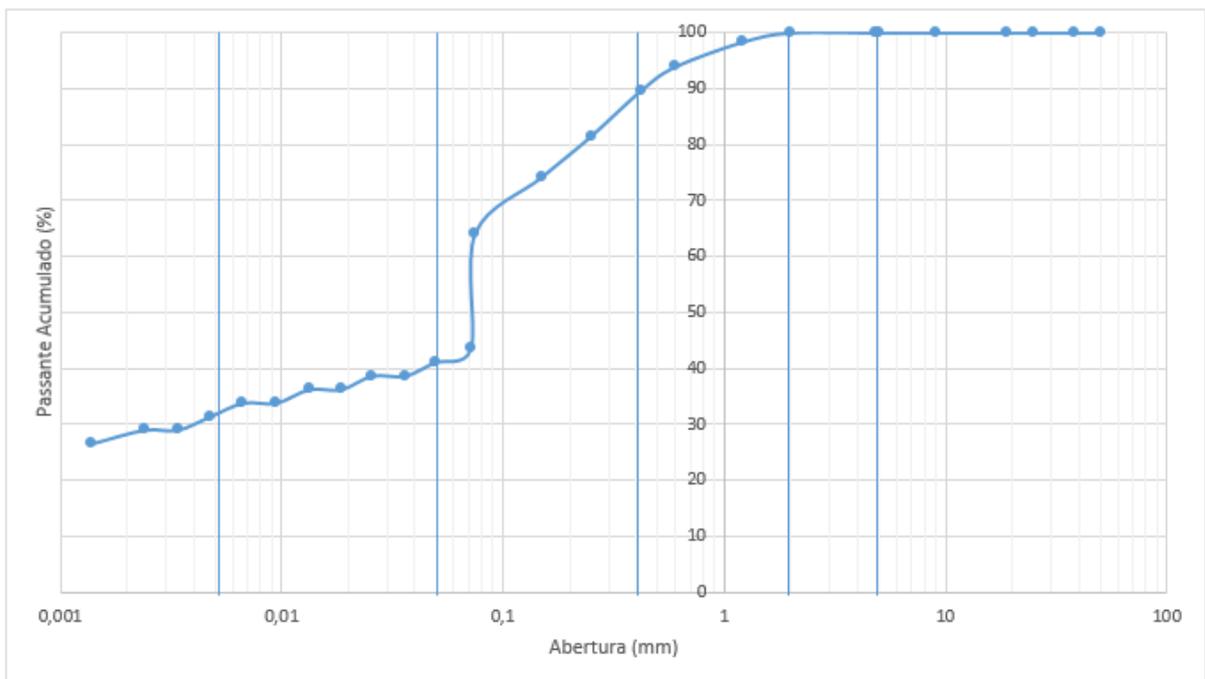
Fonte: Autoria Própria

Figura 37 – Curva de análise granulométrica para a amostra A4.2



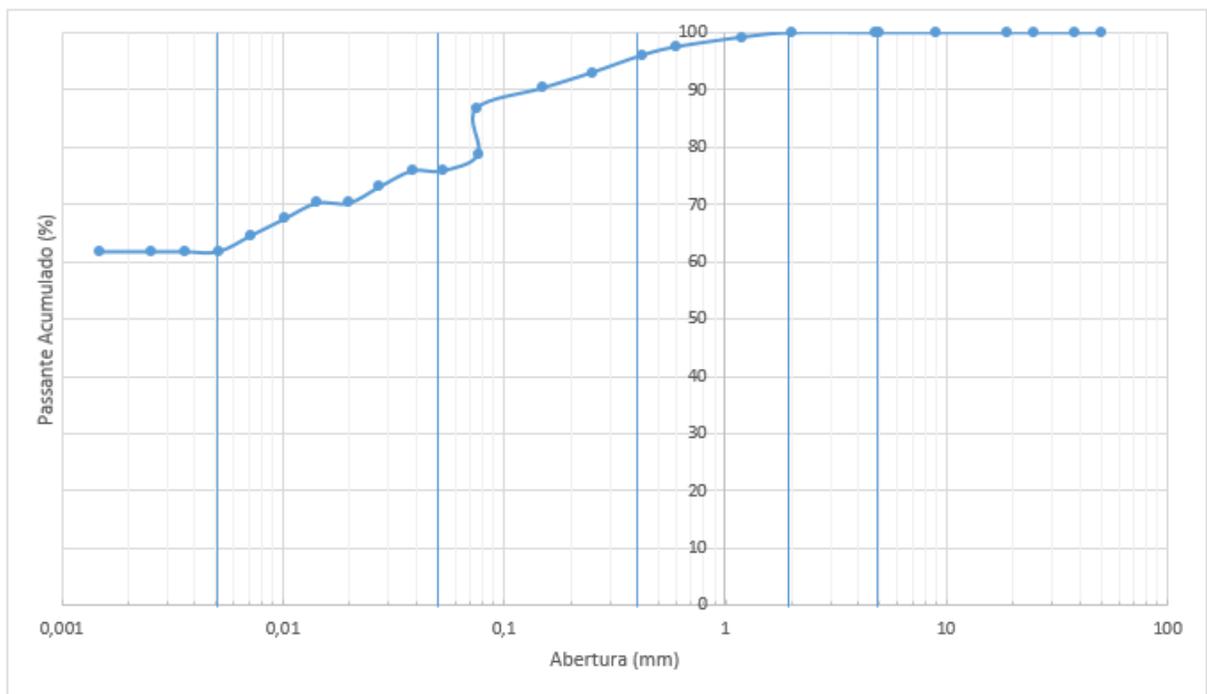
Fonte: Autoria Própria

Figura 38 – Curva de análise granulométrica para a amostra A5



Fonte: Autoria Própria

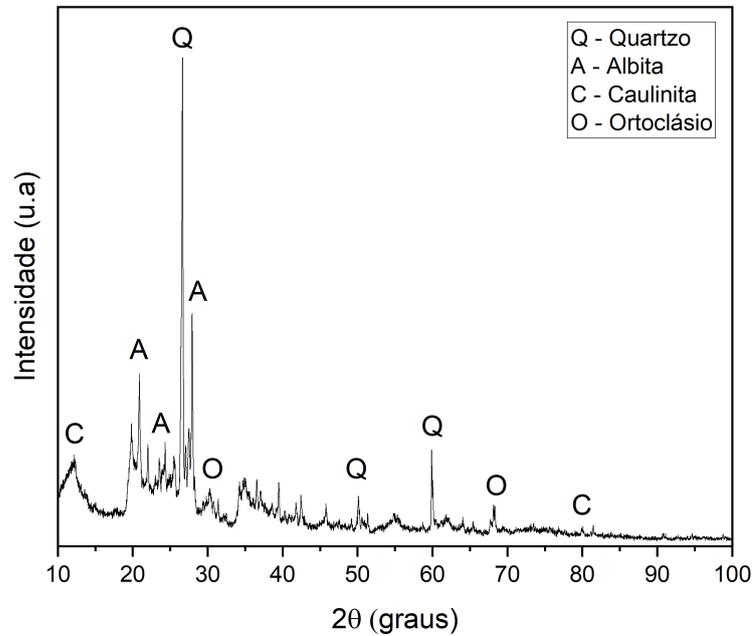
Figura 39 – Curva de análise granulométrica para a amostra A6



Fonte: Autoria Própria

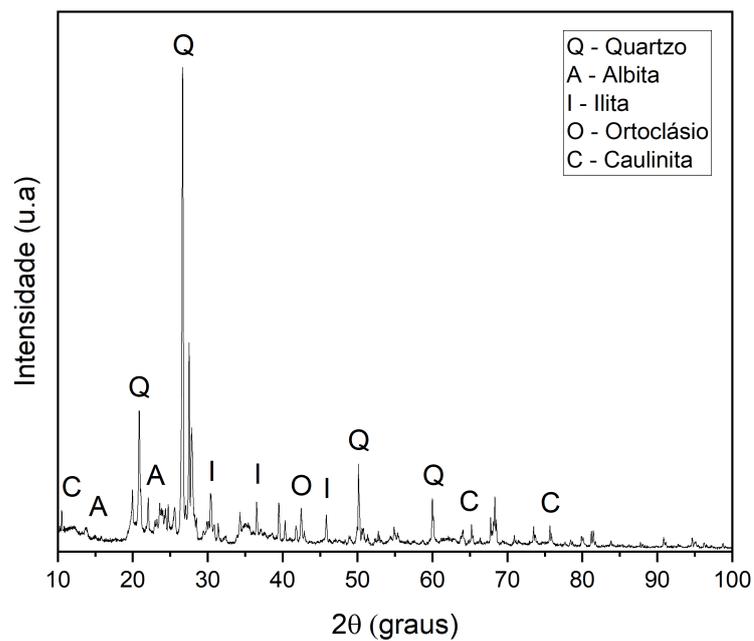
APÊNDICE D – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS A1, A2, A3, A4.1, A4.2, A5, A6.

Figura 40 – Difratoograma para a amostra A1



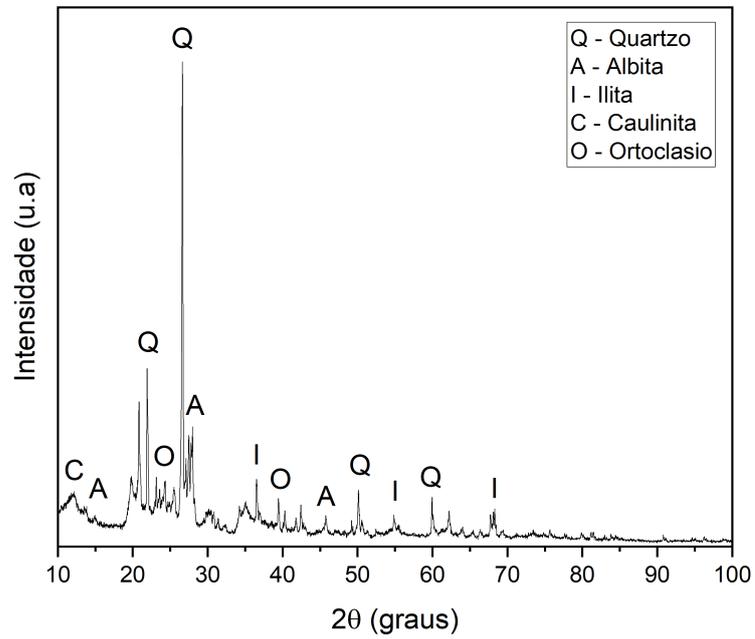
Fonte: Autoria Própria

Figura 41 – Difratoograma para a amostra A2



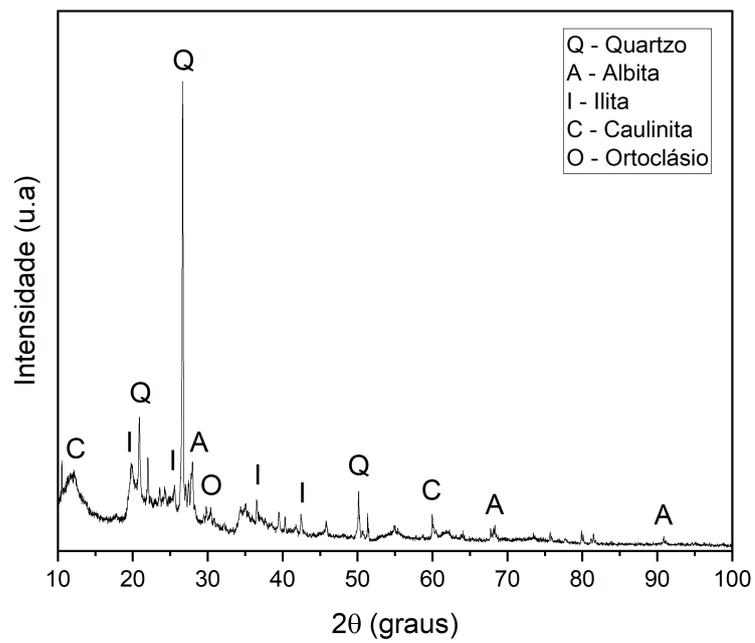
Fonte: Autoria Própria

Figura 42 – Difratoograma para a amostra A3



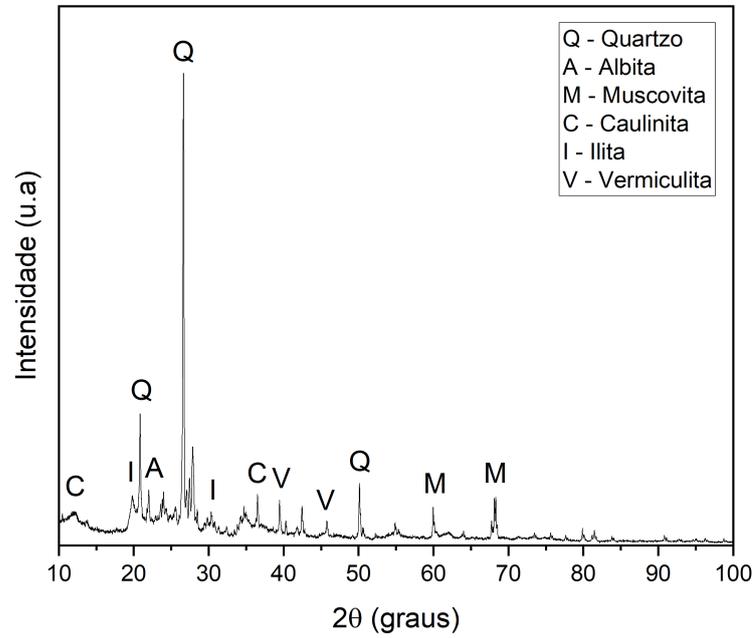
Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Difratoograma para a amostra A4.1



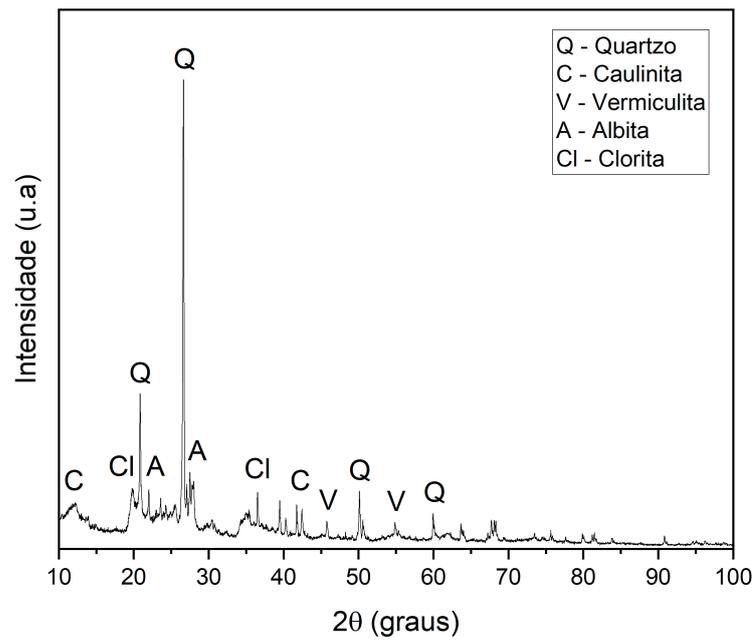
Fonte: Autoria Própria

Figura 44 – Difratoograma para a amostra A4.2



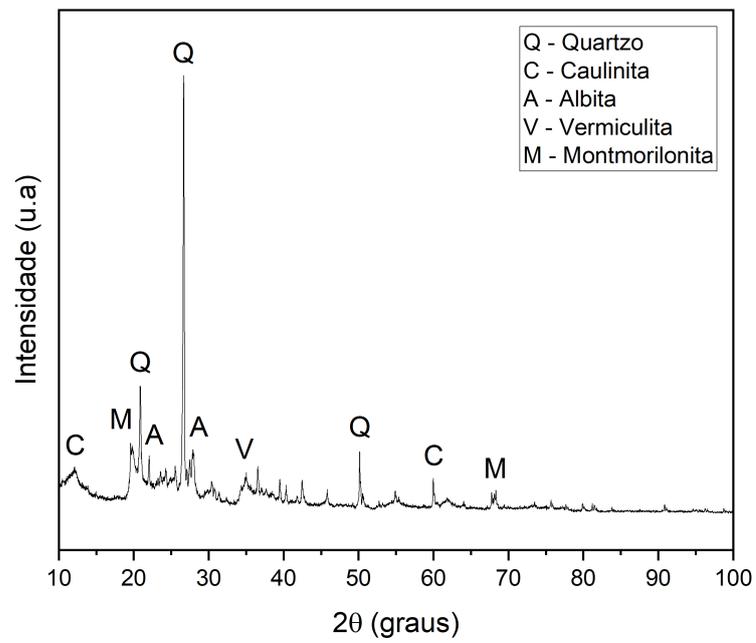
Fonte: Autoria Própria

Figura 45 – Difratoograma para a amostra A5



Fonte: Autoria Própria

Figura 46 – Difratoograma para a amostra A6



Fonte: Autoria Própria

ANEXO A – PRINCIPAIS ARGILOMINERAIS

Tabela 23 – Principais Argilominerais.

Classe geral	Família	Nome do grupo	Argilomineral
Silicatos em camadas	Difórmicos ou 1:1 (Distância interplanar 7 Å)	Caulinita	Nacrita
			Diquita
			Caulinita
			Haloisita (7 Å)
			Haloisita (10 Å)
		Serpentinita	Antigorita
			Crisotila
			Lizardita
			Ortosserpentina
			Amesita
	Trifórmicos ou 2:1 (Distância interplanar 10 Å)	Esmectita	Cronstedtita
			Chamosita
			Nontronita
			Volconsoíta
			Montmorilonita
		Vermiculita	Saponita
			Sauconita
			Hectorita
			Vermiculita Dioctaédrica
			Vermiculita Trioctaédrica
Micas hidratadas		Moscovita – ilita	
		Glauconita	
		Paragonita	
		Celadonita	
		Flogopita	
		Biotita-lediquita	
		Lepidomelana	
		Pirofilita	
Silicatos fibrosos	10 Å	Paligorsquita	Paligorsquita
	12 Å	Sepiolita	Sepiolita

Fonte: Adaptado de Santos (1989).