



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

LUIZ FELIPE ALVES DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE ARGILAS LOCALIZADAS NA ÁREA
DA EMPRESA MINERAÇÃO DO NORDESTE

CRATEÚS

2022

LUIZ FELIPE ALVES DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE ARGILAS LOCALIZADAS NA ÁREA DA
EMPRESA MINERAÇÃO DO NORDESTE

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. Ma. Tiany Guedes
Cota

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

CRATEÚS

2022

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)

S236c Santos, Luiz Felipe Alves dos.
Caracterização física e química de argilas localizadas na área da empresa Mineração do Nordeste / Luiz Felipe Alves dos Santos. – 2022.
79 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2022.

Orientação: Profa. Ma. Tiany Guedes Cota.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.

1. Propriedades. 2. Fluorescência de raios X. 3. Aplicação industrial. I. Título.

CDD 622

LUIZ FELIPE ALVES DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE ARGILAS LOCALIZADAS NA ÁREA DA
EMPRESA MINERAÇÃO DO NORDESTE

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

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

Me. Agnaldo Francisco de Freitas Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Wollker Cunha Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe Maria, agradeço simplesmente por tudo. À Fernanda, estar com você é a representação física da felicidade. Aos meus amigos, em especial Thalia agradeço por sempre estar ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

À Professora Ma. Tiany Guedes Cota e ao professor Dr. Fco Diones Oliveira Silva por todo empenho, dedicação e paciência, e por me orientar no meu trabalho de conclusão de curso.

À toda a equipe do Laboratório de Solos, da UFC campus do Pici, por todo o apoio, ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado na realização dos ensaios.

À empresa Mineração do Nordeste por aceitar fornecer material e análises que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que culminou na realização deste trabalho.

À Ma. Andreza Morais e ao Me. Wollker Cunha Soares pela ajuda e orientação na preparação das amostras.

Ao Me. Edno Cerqueira Júnior, por ter aceitado compor a banca na defesa do TCC I.

Aos membros da banca, Me. Wollker Cunha Soares e Me. Agnaldo Francisco de Freitas Filho, muito obrigado pelos seus comentários e avaliações.

À minha família por sempre me apoiar, em especial a minha mãe Maria por toda a confiança, amor e apoio incondicional.

"Rir é um ato de resistência."

(Paulo Gustavo)

RESUMO

O conhecimento das propriedades das argilas é fundamental para sua destinação a uma aplicação adequada. O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização física e química de argilas presentes na mineração de ferro da empresa Mineração do Nordeste localizada no município de Sobral. O material coletado foi analisado de modo a determinar as características físicas e químicas por meio de fluorescência de raios X, granulometria, índices de consistência e densidade. Os resultados dos ensaios de fluorescência de raios X evidenciaram que a porcentagem de SiO_2 , varia de 29,2 a 63,1%, já o teor de Al_2O_3 apresenta variação de 10,1 a 20,6%, e a porcentagem de Fe_2O_3 varia de 13,2 a 46,5%. Para os ensaios de granulometria a porcentagem de argila varia de 5,3% a 49,5%, sendo o maior valor obtido na amostra 1. As amostras 2, 3 e 5 apresentam um valor alto da fração pedregulho (42,6%, 49,1% e 37,2%, respectivamente), já na amostra 4 predomina a fração silte (25%). Utilizando a composição granulométrica juntamente com o diagrama de Winkler, evidenciou-se que apenas a amostra 4 se encontra dentro da região aproveitável para aplicação na cerâmica vermelha. Nos ensaios de índice de consistência observou-se que as amostras 2, 3 e 5 são consideradas medianamente plásticas com valores de IP de 12,5%, 11% e 14%, já as amostras 1 e 4 são classificadas como altamente plásticas, apresentando IP de 30,5% e 20,5%, atendendo aos critérios para aplicação como matéria prima em indústria de cerâmica vermelha. Os valores de densidade variaram de 2,32 g/cm^3 a 2,76 g/cm^3 . As amostras mostram possíveis aplicações como: agregados na construção civil, fluido de perfuração, fabricação de painéis de barro e matéria prima para nanocompósitos, porém existe a necessidade de um estudo mais detalhado comprovação da aplicação.

Palavras-chave: Propriedades. Fluorescência de raios X. Aplicação industrial.

ABSTRACT

Knowledge of the properties of clays is essential for their destination for a suitable application. The objective of this work was to carry out the physical and chemical characterization of clays present in the iron mining of the company Mineração do Nordeste located in the municipality of Sobral. The collected material was analyzed in order to determine the physical and chemical characteristics by means of X-ray fluorescence, granulometry, consistency and density indices. The results X-ray fluorescence tests showed that the percentage of SiO_2 varies from 29.2 to 63.1%, whereas the content of Al_2O_3 varies from 10.1 to 20.6%, and the percentage of Fe_2O_3 varies from 13.2 to 46.5%. For the granulometry tests, the percentage of clay varies from 5.3% to 49.5%, with the highest value obtained in sample 1. Samples 2, 3 and 5 present a high value of the gravel fraction (42.6 %, 49.1% and 37.2%, respectively), whereas in sample 4 the silt fraction predominates (25%). Using the granulometric composition together with the Winkler diagram, it was shown that only sample 4 is within the usable region for application in red ceramic. In consistency index tests, it was observed that samples 2, 3 and 5 are considered moderately plastic with IP values of 12.5%, 11% and 14%, while samples 1 and 4 are classified as highly plastics, presenting IP of 30.5% and 20.5%, meeting the criteria for application as raw material in the red ceramic industry. Density values ranged from 2.32 g/cm^3 to 2.76 g/cm^3 . The samples show possible applications such as: aggregates in civil construction, drilling fluid, manufacture of clay pots and raw material for nanocomposites, but there is a need for a more detailed study to prove the application.

Keywords: Properties. X-ray fluorescence.industrial application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização de São José do Torto no município de Sobral.	16
Figura 2 – Mapa da área de estudo.	17
Figura 3 – Mapa de aspectos hidrográficos do município de Sobral.	18
Figura 4 – Província Borborema.	20
Figura 5 – Modelo de mineralização de ferro no Grupo Ubajara.	24
Figura 6 – Modelo de mineralização de ferro no Grupo Jaibaras.	24
Figura 7 – Modelo simplificado do ensaio de fluorescência de raios X	29
Figura 8 – Representação da curva granulométrica	30
Figura 9 – Índices de consistência	32
Figura 10 – Área de lavra da empresa MDN.	33
Figura 11 – Fluxograma de Beneficiamento da MDN.	34
Figura 12 – Mapa de regiões de amostragem.	37
Figura 13 – Representação do ensaio de limite de liquidez.	42
Figura 14 – Características do material coletado no ponto 01	45
Figura 15 – Amostra 01 na lupa com aumento de 10 vezes.	46
Figura 16 – Características do material coletado no ponto 02	47
Figura 17 – Amostra 02 na lupa com aumento de 10 vezes.	48
Figura 18 – Características do material coletado no ponto 03	49
Figura 19 – Amostra 03 na lupa com aumento de 10 vezes.	49
Figura 20 – Características do material coletado no ponto 04	50
Figura 21 – Amostra 04 na lupa com aumento de 10 vezes.	50
Figura 22 – Características do material coletado no ponto 05	51
Figura 23 – Amostra 05 na lupa com aumento de 10 vezes.	52
Figura 24 – Coloração das amostras.	54
Figura 25 – Curva granulométrica das amostras.	55
Figura 26 – Diagrama de winkler.	57
Figura 27 – Limite de liquidez amostra 1.	73
Figura 28 – Limite de liquidez amostra 1'.	73
Figura 29 – Limite de liquidez amostra 2.	74
Figura 30 – Limite de liquidez amostra 2'.	74
Figura 31 – Limite de liquidez amostra 3.	75

Figura 32 – Limite de liquidez amostra 3'	75
Figura 33 – Limite de liquidez amostra 4.	76
Figura 34 – Limite de liquidez amostra 4'	76
Figura 35 – Limite de liquidez amostra 5.	77
Figura 36 – Limite de liquidez amostra 5'	77
Figura 37 – Bacia Hidrográfica de Acaraú.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipo e características dos solos de Sobral	19
Tabela 2 – Classificação dos Argilominerais	28
Tabela 3 – Usos das argilas	36
Tabela 4 – Resultado da análise química por fluorescência de raios X	52
Tabela 5 – Óxidos fundentes presentes nas amostras	53
Tabela 6 – Composição granulométrica das amostras	56
Tabela 7 – Resultado dos ensaios de LP.	57
Tabela 8 – Resultado dos índices de consistência.	58
Tabela 9 – Classificação das argilas por meio do IP.	58
Tabela 10 – Valores de referência aceitos na prática industrial	59
Tabela 11 – Classificação das amostras de acordo com os parâmetros de Dondi (2006).	59
Tabela 12 – Valores obtidos no Índice de consistência vs valores encontrados por Macedo <i>et al.</i> (2008)	59
Tabela 13 – Resultado picnometria	61
Tabela 14 – Distribuição granulométrica realizado por Santis (2012).	62
Tabela 15 – Valores de índice de consistência e densidade comparados com a amostra 1	62
Tabela 16 – Resultados da análise química encontrados por Santis (2012)	63
Tabela 17 – Densidade obtida por Batista (2010)	64
Tabela 18 – Análise química obtida por Batista (2010)	64
Tabela 19 – Análise química obtida por Borlini e Caranassios (2007)	65
Tabela 20 – Análise química obtida por Rodrigues <i>et al.</i> (2007)	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
1.2	Estrutura do trabalho	15
2	GEODIVERSIDADE	16
2.1	Localização	16
2.2	Área de estudo	17
2.3	Clima e Vegetação	17
2.4	Hidrografia	18
2.5	Solos	18
2.6	Contexto Geológico	19
<i>2.6.1</i>	<i>Grupo Ubajara</i>	<i>19</i>
<i>2.6.2</i>	<i>Grupo Jaibaras</i>	<i>21</i>
<i>2.6.3</i>	<i>Atividade Magmática</i>	<i>22</i>
<i>2.6.4</i>	<i>Minério Associado</i>	<i>22</i>
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1	Argilas	25
<i>3.1.1</i>	<i>Classificação das argilas</i>	<i>26</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Argilominerais</i>	<i>27</i>
3.2	Caracterização química	28
<i>3.2.1</i>	<i>Fluorescência de Raios X</i>	<i>29</i>
3.3	Caracterização Física	29
<i>3.3.1</i>	<i>Granulometria por peneiramento</i>	<i>29</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Granulometria por sedimentação</i>	<i>30</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Índices de Consistência</i>	<i>31</i>
<i>3.3.4</i>	<i>Densidade</i>	<i>32</i>
3.4	Mineração Do Nordeste	33
3.5	Aplicações na indústria	35
4	METODOLOGIA	37

4.1	Amostragem	37
4.2	Preparação da amostra	38
4.3	Caracterização química	38
4.3.1	<i>Fluorescência de Raios X</i>	38
4.4	Caracterização Física	38
4.4.1	<i>Descrição das amostras</i>	38
4.4.2	<i>Análise Granulométrica</i>	39
4.4.3	<i>Índices de consistência</i>	41
4.4.4	<i>Densidade</i>	43
4.5	Estudo de possíveis aplicações	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Características visuais	45
5.1.1	<i>Amostra 01</i>	45
5.1.2	<i>Amostra 02</i>	46
5.1.3	<i>Amostra 03</i>	48
5.1.4	<i>Amostra 04</i>	49
5.1.5	<i>Amostra 05</i>	51
5.2	Análise química	52
5.3	Caracterização física	55
5.3.1	<i>Análise granulométrica</i>	55
5.3.2	<i>Índices de consistência</i>	57
5.3.3	<i>Densidade</i>	61
5.4	Possíveis Aplicações	61
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICES	73
	APÊNDICE A – Resultados do ensaio de limite de liquidez	73
	ANEXOS	73
	ANEXO A – Bacia hidrográfica do Acaraú.	78

1 INTRODUÇÃO

Um dos conhecimentos a muito difundido nas civilizações é a capacidade de manusear a argila para o benefício próprio. Uma prova da ligação entre a argila e o homem pode ser encontrada na bíblia, com a criação do primeiro homem. De acordo com Pozzer (1999), algumas civilizações na região da mesopotâmia desenvolveram um sistema de escrita feito em tabuletas de argila, as quais eram posteriormente levadas ao fogo e endurecidas. Desse modo eram feitos os registros, entretanto, sem se dar conta, esses povos descobriram outro uso para a argila, pois quando queimada a mesma se tornava permanentemente dura, ou seja, deixava de ser argila e passava a ser cerâmica. Estava descoberta a indústria da cerâmica, e com ela, uma das mais antigas formas de se expressar.

A argila exerceu tanta influência no período Neolítico que, para Stevanović (1997), a idade do cobre é precedida pela idade da argila, período marcado pela agricultura e pela construção de casas feita por este material.

As argilas são provenientes da degradação de material pré-existente, seja ele rocha ou mineral. Atualmente, não são mais utilizadas para a escrita, mas ainda desempenham um papel importante no cotidiano para a confecção de peças cerâmicas. Além disso, a mesma pode ser utilizada nos mais distintos campos da sociedade como arte, indústria de cosméticos, medicina, construção civil, perfuração de poços, automobilismo e engenharia. Destaca-se que, a aplicação industrial é determinada a partir das características que o material apresenta, que sejam compatíveis com uma ou outra atividade, sendo por isso necessário estudos de caracterização com a intenção de conhecer as principais propriedades do material.

A Mineração do Nordeste é uma empresa que realiza a extração de ferro em São José do Torto na cidade de Sobral, Ceará. A ocorrência do minério está centrado em colúvios e elúvios próximos ao maciço, associado com argila em toda a extensão do depósito. Nos períodos de chuva, que vão de janeiro a maio, a grande quantidade de argila presente no depósito causa a diminuição do teor do concentrado, devido a alta umidade presente na alimentação, inviabilizando o processo.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar a caracterização física e química das argilas presentes na mina, a fim de conhecer as principais características e sugerir possíveis aplicações em segmentos industriais.

1.1 Objetivos

Nesta seção são evidenciados os objetivos geral e específicos do presente trabalho.

1.1.1 *Objetivo Geral*

- Realizar a caracterização física e química de argilas que recobrem as jazidas de minério de ferro da empresa Mineração do Nordeste.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Identificar as principais características físicas e químicas das argilas.
- Verificar a possibilidade de reaproveitamento dessas argilas em diferentes segmentos industriais, baseando em dados de revisão da literatura.
- Contribuir com o conhecimento científico da região estudada.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

- O primeiro capítulo traz uma introdução ao tema deste trabalho, apresentando uma ambientação sobre o tema, a justificativa e a relevância da realização do projeto, além de apresentar os objetivos a serem alcançados.
- O capítulo dois apresenta a geodiversidade, abordando os aspectos da região como: localização, área de estudo, clima, vegetação, hidrografia, solos e contexto geológico.
- O capítulo três apresenta a fundamentação teórica, mostrando uma revisão sobre argilas e sua classificação, além das técnicas utilizadas para caracterização tecnológica das argilas, além de algumas características da Mineração do Nordeste.
- O capítulo quatro aborda a metodologia que foi utilizada para caracterização das argilas.
- O capítulo cinco apresenta os resultados obtidos, assim como a discussão sobre possíveis aplicações
- O capítulo seis trata das conclusões obtidas.

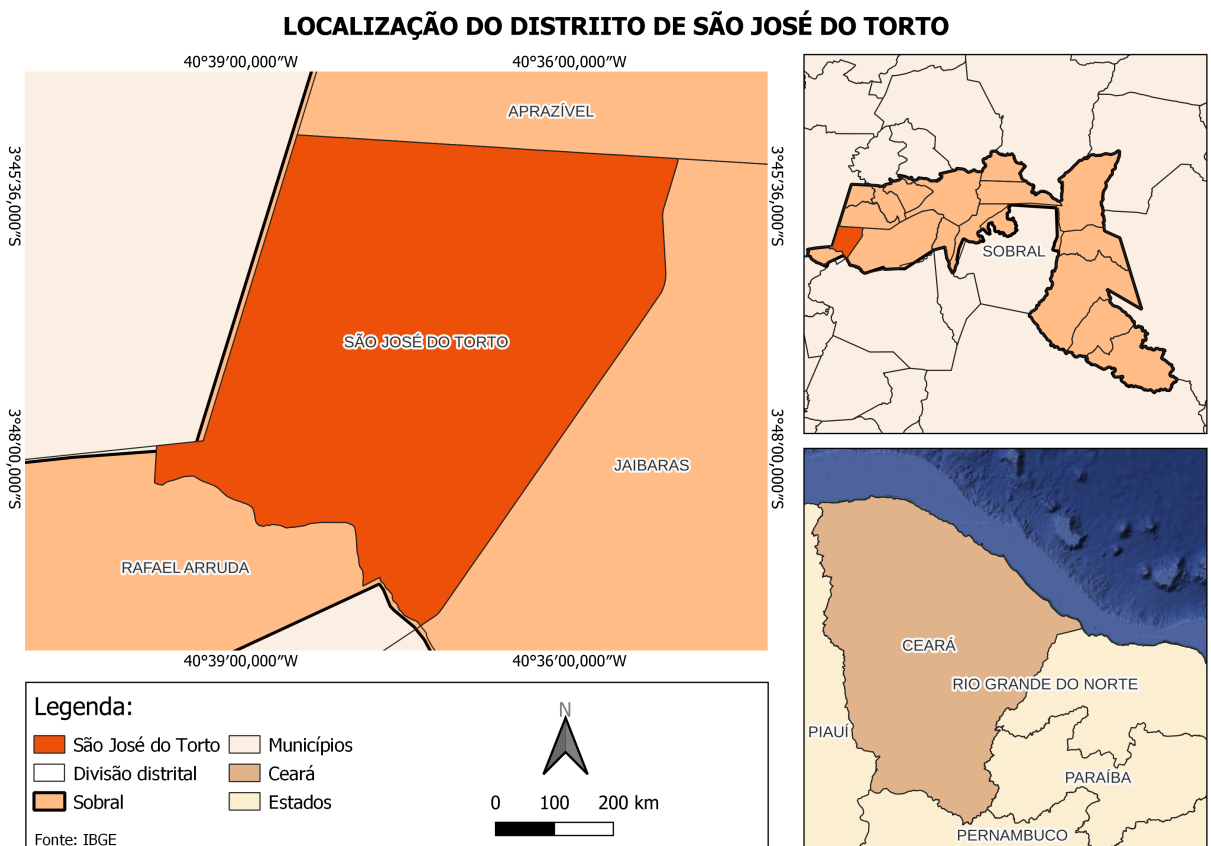
2 GEODIVERSIDADE

2.1 Localização

Sobral é uma cidade situada na porção norte do estado do Ceará, a uma distância de 235 km da capital Fortaleza, ligada a esta pela BR-222. De acordo com IBGE (2001), Sobral possui uma área de 2068,47 km² e a sua população é estimada em 212.437 habitantes. Atualmente está entre as cidades que mais se desenvolveram na última década, sendo referência nacional em muitas áreas, tais como: saúde, educação, comércio e indústria (SOBRAL, 20–).

Foi elevada a condição de cidade pela lei provincial n.º 222 no ano de 1841, e atualmente é dividida em 13 distritos, sendo eles: Sobral, Aprazível, Aracatiáçu, Bonfim, Caioca, Caracará, Jaibaras, Jordão, Rafael Arruda, Patos, Patriarca, Taparuaba e São José do torto (IBGE, 20–). Este último com latitude 3°47'10"S e longitude 40°37'8"W é o distrito onde ocorre a localização do estudo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Mapa de localização de São José do Torto no município de Sobral.

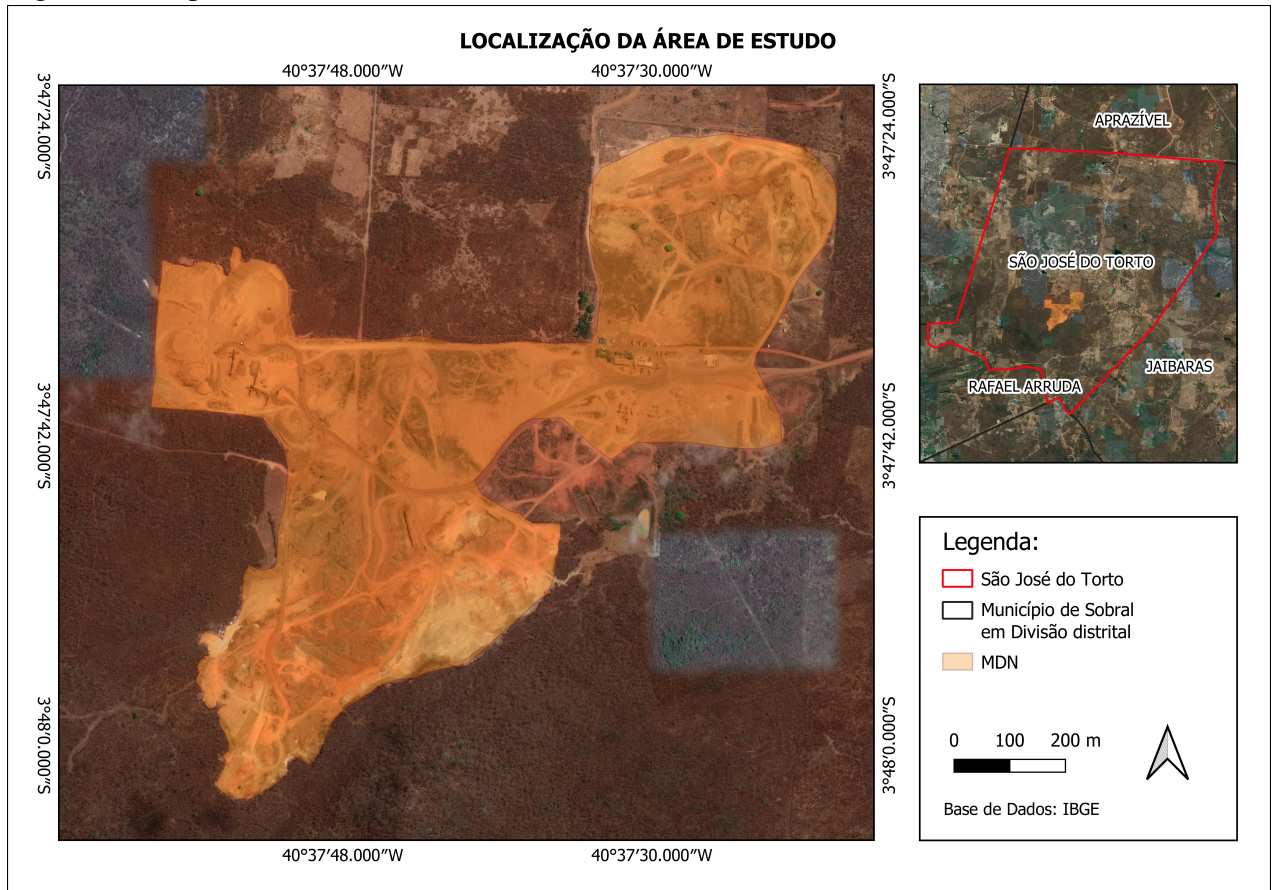


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

2.2 Área de estudo

A área de estudo se encontra dentro da lavra de minério de ferro da empresa MDN, onde foram selecionados setores para a amostragem do material. Na Figura 2, é possível observar a área que compreende a mineração e a sua localização no distrito de São José do Torto.

Figura 2 – Mapa da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

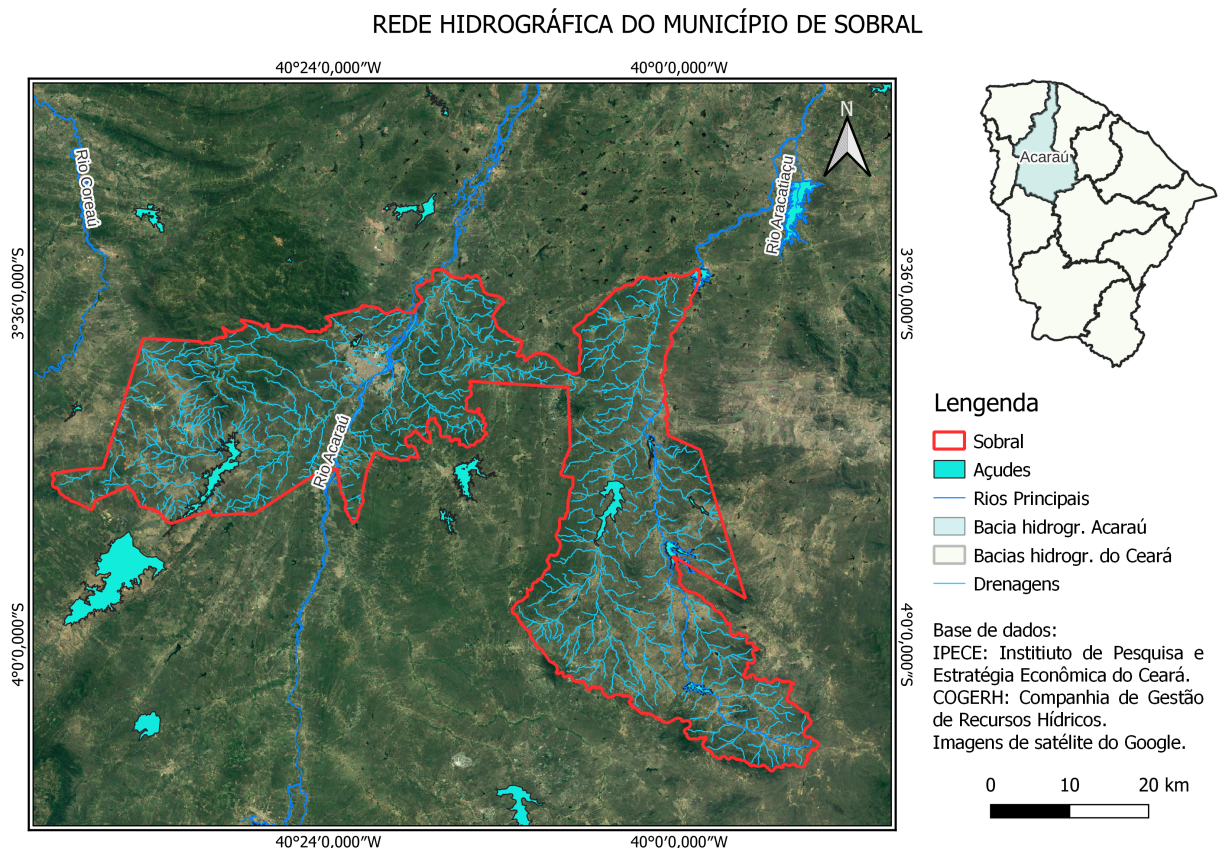
2.3 Clima e Vegetação

De acordo com CEARÁ (2007), o clima da região de Sobral é tropical quente semiárido. O período de chuvas ocorre de janeiro a maio. A vegetação é composta por Caatinga Arbustiva Aberta, Floresta Mista Dicotillo-Palmácea, Floresta Caducifolia Espinhosa e Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial (VIANA *et al.*, 2017).

2.4 Hidrografia

Sobral tem como rio principal o rio Acaraú ao norte, seguido por Groaíras, Jacurutu, Macacos e Jaibaras, como afluentes. Na Figura 3, é possível verificar os rios que cortam o município, assim como os açudes da região. Sobral é um dos municípios que fazem parte da bacia hidrográfica do Acaraú (Anexo A). Esta bacia ocupa cerca de 10 % do território do estado (SANTANA, 2009).

Figura 3 – Mapa de aspectos hidrográficos do município de Sobral.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

2.5 Solos

O solo é definido como um conjunto de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos (SANTOS *et al.*, 2018).

De acordo com Viana *et al.* (2017), os solos que compõem o município de Sobral são:

Solos Aluviais, Bruno não Cálcico, Solos Litólicos, Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo e Regossolo. A Tabela 1 apresenta os solos citados juntamente com algumas de suas principais características.

Tabela 1 – Tipo e características dos solos de Sobral

Solo	Características
Aluviais	Pouco desenvolvidos, de deposição fluvial apresentando somente o horizonte A, raramente possui horizonte B, apresentam profundidade variada de moderada a alta
Bruno não cálcico	Constituídos pelos horizontes A e B, não hidromórfico, as transições entre A e B ocorre de maneira clara sendo o horizonte A fraco enquanto o horizonte B apresenta coloração avermelhada
Litólicos	Podem ser bastante ácidos ou bastante férteis, compostos em sua maioria pelo horizonte A, e este é considerado fraco.
Planossolo solódico	São em sua maioria constituídos de saprolitos de gnaisse e magmatito, se trata de solos susceptíveis a erosão em função de sua má drenagem, apresenta horizontes A, B e C
Podzólico Vermelho-Amarelo	Geralmente constituído pelos horizontes A, B e C, sendo o horizonte A considerado fraco e o B não hidromórfico
Regossolos	São descritos como pouco desenvolvidos, bem porosos com profundidade mediana, rico em minerais primários em especial feldspato

Fonte: Adaptado de JACOMINE P. K. T.; ALMEIDA (1973)

2.6 Contexto Geológico

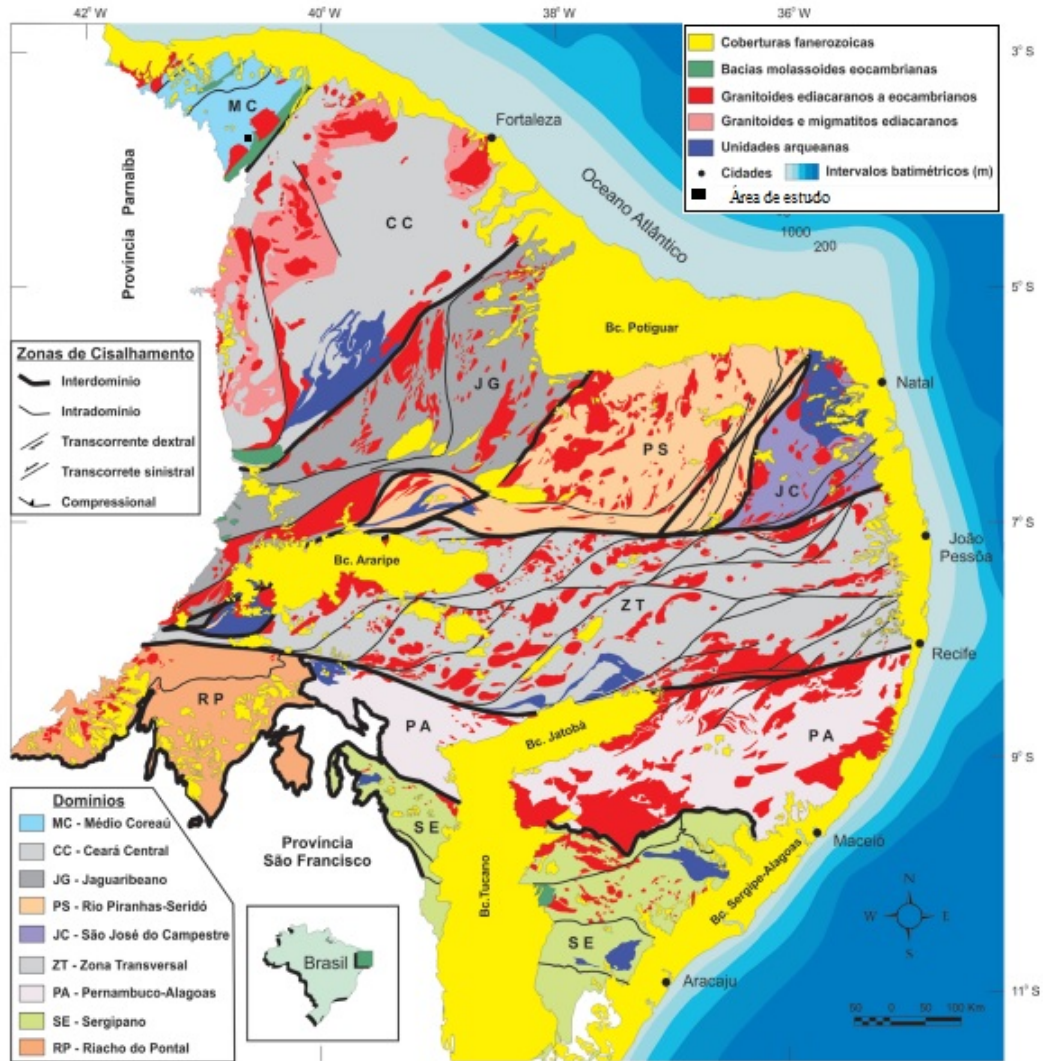
A região de estudo se encontra na Província Borborema, que está localizada na região nordeste do Brasil, é formada por terrenos arqueanos e proterozóicos, que foram retrabalhados por diversos eventos geológicos neste período e apresenta sua geometria atual devido a Orogê-nese Brasileira/Panafricana formada no período neoproterozóico a fanerozóico, constituída de sequências metassedimentares móveis que circundam terrenos arqueanos e paleoproterozóicos (PARENTE *et al.*, 2011).

Segundo Neves (1983), a Província Borborema, é subdividida em cinco domínios, sendo eles: Domínio Central, Domínio Sergipano, Domínio Jaguaribeano, Domínio Centro Oriental e Domínio Coreaú, sendo neste último a localização do Grupo Jaibaras e o Grupo Ubajara que engloba a área de estudo, conforme mostra a Figura 4.

2.6.1 Grupo Ubajara

O Grupo Ubajara é classificado como metassedimentar de baixo grau metamórfico, de idade neoproterozóica, pertencendo ao Domínio Médio Coreaú (SOUZA, 2018). O Grupo Ubajara é formado por sedimentos clastopelíticos, com presenças de fácies carbonáticas na qual é sobreposto por uma recorrência clasto pelítica (BIZZI *et al.*, 2003). Este é dividido em quatro

Figura 4 – Província Borborema.



Fonte: Adaptado de Dantas *et al.* (2019)

formações, são elas: Trapiá, Caiçaras, Coreáú e Frecheirinha.

A Formação Trapiá é a base do Grupo Ubajara constituída por quartzitos conglomeráticos, metarenitos com granulação variando de fina a grossa, estando dispostas em uma matriz siltico-argilosa (PINÉO *et al.*, 2019; HACKSPACHER *et al.*, 1988).

A Formação Trapiá trata-se de uma sequência de metapelito mudando gradualmente para arenitos arcossianos homogêneos e bem selecionados, com alguns níveis de metasiltitos, o metarenito compõe grande parte da formação, apresentando estratificações plano paralelas, cruzadas e angulares já o metasiltito apresenta uma estrutura detrítica em uma matriz foliada, sendo composto por quartzo e plagioclásios, além da presença de minerais acessórios como sericita, muscovita, óxido de ferro e argilominerais (HACKSPACHER *et al.*, 1988).

A Formação Caiçaras é composta por ardósias oriundas do metamorfismo de rochas sedimentares argilosas, esta também conta com a intercalação de metassiltitos e metarenitos, enquanto que a Formação Coreaú é composta por metarenitos arcosianos com intercalações de metapelitos, sendo a última formação equilave ao topo do Grupo Ubajara (PINÉO *et al.*, 2019).

A Formação Frecheirinha é constituída por mármore de granulação fina, com intercalações de metassiltito, quartzito e marga (PINÉO *et al.*, 2019). De acordo com Hackspacher *et al.* (1988), além das já mencionadas, ocorre também intercalações de pirita e de microesparito, além disso ocorre a presença de veios com calcita, dolomita e quartzo.

2.6.2 Grupo Jaibaras

O Grupo Jaibaras foi formado entre o ediacarano e o cambro-ordoviano, possui sequências sedimentares compostas por conglomerados, arenitos, siltitos e/ou folhelhos, separados por erosão e associados ao vulcanismo bimodal. Esta apresenta duas zonas de cisalhamento expressivas, que limitam sua extensão ao sul e ao norte, as zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II e Café Ipueiras nessa ordem (PARENTE *et al.*, 2011). O Grupo Jaibaras é dividido entre as formações Massapê, Aprazível, Pacujá e Parapuí. Abaixo estão descritas as formações.

A Formação Massapê é constituída de conglomerado polimiticos brechoide com a granulometria do arcabouço variando de seixo a matacão, os clastos possuem composição de gnaisses, xistos, quartzo, feldspatos, microgranitos distribuídos numa matriz arenosa de granulação grossa e coloração marrom. (SILVA JUNIOR. *et al.*, 2014; PARENTE *et al.*, 2011; OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003).

A Formação Aprazível também é formada por rochas sedimentares (conglomerados, arenitos arcosianos alternando com arenito e siltitos de coloração marrom), os conglomerados são polimiticos, brechoides compostos por seixos de gnaiss, quartzitos, mármore, granitos, quartzos e feldspatos inseridos em uma matriz de arenito (SILVA JUNIOR. *et al.*, 2014). De acordo com Parente *et al.* (2011), ocorrem também lentes de riolito, intercaladas com conglomerado, já Oliveira e Mohriak (2003), afirmam que os clastos presentes tem origem plutônica, vulcânica e que há clastos oriundos das formações Massapê e Pacujá.

A Formação Pacujá situada mais distante da Formação Massapê, também é formada por rochas sedimentares e vulcânicas. Formada por arenitos intercalados com pelitos e rochas vulcânicas, os arenitos presentes possuem granulometria fina até muito fina (SILVA JUNIOR. *et al.*, 2014), estes arenitos apresentam estratificações plano-paralela ou maciça, com coloração

roxa, assim como as camadas de siltitos e folhelhos (PARENTE *et al.*, 2011).

Enquanto que a formação Parapuí é constituída por basalto andesito, vulcanoclásticos, andesitos, riolitos, sienito e dolerita, o basalto apresenta espessura de 350 metros com a ocorrência de diques sem direção dominante, apresenta ainda sills intercalando com sedimentos das formações Massapê e Pacujá (OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003).

2.6.3 Atividade Magmática

São identificados três eventos de origem magmática presentes na região, são eles diques de Coreaú, maciços Meruoca e Mucambo.

Os diques de Coreaú são formados por conjuntos paralelos e subvertical de diques que atravessam o Grupo Ubajara aflorando a oeste do Grupo Jaibaras, compostos por microgranitos e riolitos com textura porfirítica (OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003).

O Granito Meruoca mais ao norte, possui uma geometria grosseiramente quadrada, ocupando uma área de 400 km² (OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003). Limitada pelas zonas de cisalhamento, apresenta os seguintes litotipos: ortoclásio, granito, pertita de quartzo e sienitos (SILVA JUNIOR. *et al.*, 2014), apresenta várias fraturas preenchidas por cobre, ferro, corita e epidoto (PARENTE *et al.*, 2011). Enquanto que o maciço Mucambo está localizado a nordeste do Grupo Jaibaras, ocupando uma área de 180 km² (PARENTE *et al.*, 2011).

Composto por biotita-hornblenda, sienogranito e monzogranito. Ocupando uma área de 200 km², apresenta um contato discordante com as rochas pré-existentes, sendo limitado por um lado pelo Grupo Ubajara apresentado auréolas de metamorfismo, e no contato com o Grupo Jaibaras o mesmo acontece sem a presença desta auréola e com a presença de falhas (OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003).

Ambos os granitos exibem intrusões dentro dos Grupos Ubajara e Jaibaras, e estes também se beneficiaram das reativações das zonas de cisalhamento (PARENTE *et al.*, 2011).

2.6.4 Minério Associado

A interação entre o Granito Mucambo e o Grupo Ubajara é caracterizado por um metamorfismo de contato, sua atuação é maior na Formação Trapiá e na Formação Frecheirinha. Costa *et al.* (1973), descreve duas maneiras de ocorrência do minério de ferro da fazenda Angustura, o primeiro são blocos de origem colúvio/aluvial e a segunda seria a presença de diques ocorrendo nos calcários da formação Frecheirinha e quartzitos da formação Coreaú.

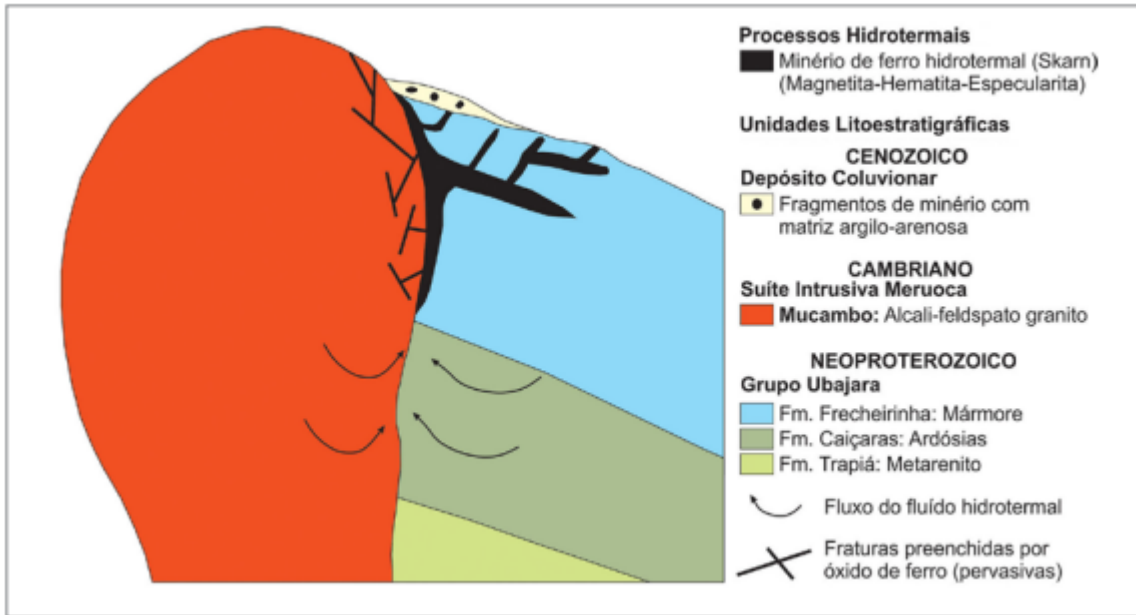
Já Veríssimo *et al.* (2007), determinou os três principais tipos de minério, são eles: minério especularítico, hematítico maciço e magnetítico granular

Costa *et al.* (1973), e Veríssimo *et al.* (2007), atribuem a gênese do minério primário a um hidrotermalismo tardio no Granito Mucambo, remobilizando e concentrando o ferro na Formação Caiçaras e fraturas próximas, enquanto que o minério coluvionar tem sua gênese atribuída aos processos de intemperismo e transporte do minério residual. A Figura 5 mostra um modelo proposto para concentração de minério de ferro, nesta é possível observar o contato entre o Granito Mucambo com as formações Frecheirinha, Caiçaras e Trapiá. Também é possível observar os depósitos de ferro coluvionares, sendo a área de estudo inserida nesta unidade.

O contato entre o Granito Mucambo e os metacalcários da Formação Frecheirinha contribuiu para o hidrotermalismo tardio e para a formação do depósito do tipo Skarn, este possui dominância de óxido de ferro e sulfetos de cobre e ferro (PINÉO *et al.*, 2019).

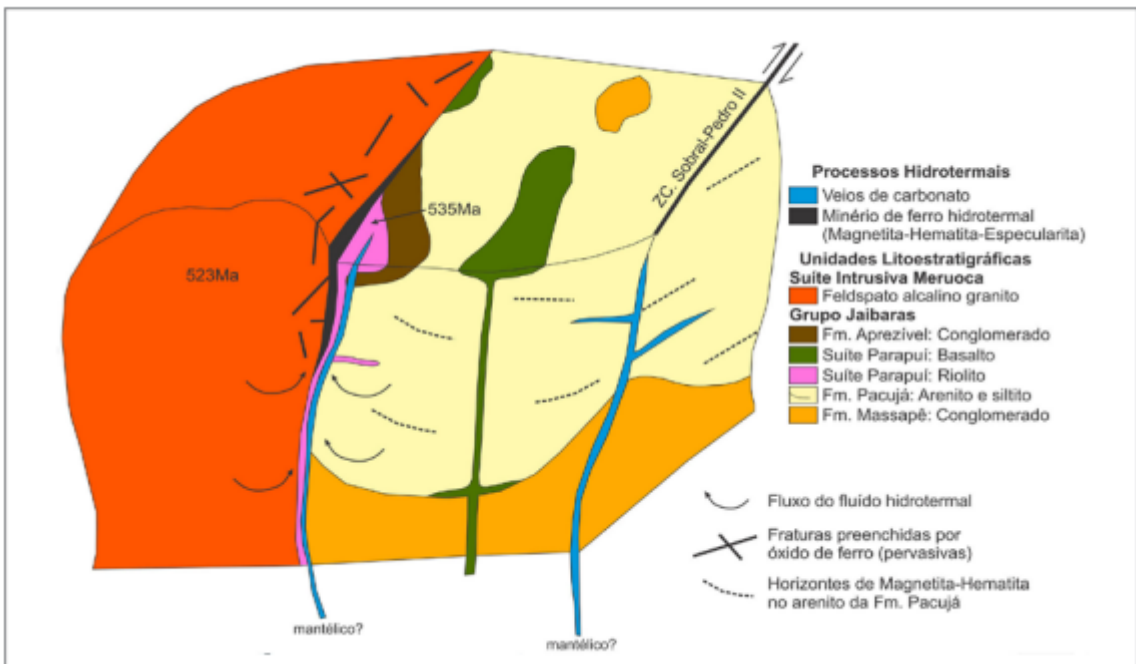
No Grupo Jaibaras, de acordo com Parente *et al.* (2011), a presença de mineralizações de ferro e cobre, juntamente com processos hidrotermais são características comumente encontradas em depósitos do tipo IOCG, as principais ocorrências de ferro e cobre ocorrem na zona de contato entre o Granito Meruoca e o Grupo Jaibaras e são divididos em cinco grupos, são eles: corpos magnetíticos-hematíticos, riolitos brechados, granitos brechados com pirita e calcopirita, basaltos da Formação Parapuí com vênulas de óxido de ferro e arenitos da Formação Pacujá com vênulas de calcopirita. A Figura 6 é uma representação para a concentração de ferro na região de contato entre o Granito Meruoca e o Grupo Jaibaras.

Figura 5 – Modelo de mineralização de ferro no Grupo Ubajara.



Fonte: PINÉO *et al.* (2019)

Figura 6 – Modelo de mineralização de ferro no Grupo Jaibaras.



Fonte: PINÉO *et al.* (2019)

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na Fundamentação Teórica são abordados conteúdos que são de grande importância para a compreensão da pesquisa, com o intuito de aprofundar nos conhecimentos fundamentais sobre o tema proposto no trabalho. Neste sentido, serão abordados os conceitos de argila e argilominerais, e posteriormente são descritas as técnicas para a caracterização física e química, bem como algumas aplicações industriais.

3.1 Argilas

No livro *Theaetetus* de Platão (428 a.C. - 348 a.C.), Sócrates tem o seguinte diálogo:

[...] Suponha que uma pessoa fosse te perguntar sobre algo muito trivial e óbvio por exemplo, o que é argila? [...] Além disso, ele poderia responder de maneira direta e simples, mas ele fez um enorme circuito. Por exemplo quando perguntado sobre o que é argila, ele poderia simplesmente ter dito que argila é a mistura de terra e um pouco de água, o tipo de argila não é a questão (PLATÃO, 369 a.c.)

O termo argila, diferentemente do que Sócrates afirma, não é tão trivial e óbvio. Isso porque a argila possui diferentes definições de acordo com a área de estudo. Na área de solos, Pinto (2016), conceitua a argila como sendo um material de granulometria abaixo de 2 μm . Na geologia sedimentar, Suguio (2003), descreve que as argilas são formadas por silicatos de alumínio hidratado relacionados aos grupos da caulinita, illita e vermiculita. De maneira mais ampla, Santos (1989), define a argila como sendo um material terroso que adquire uma plasticidade na presença de uma certa quantidade de água.

Fatores como variação de temperatura, chuvas, composição da rocha matriz e vegetação podem favorecer que as argilas se formem por meio de intemperismo, enquanto que aquelas formadas pelos processos de sedimentação possuem a sua composição dependente do ambiente em que se formam (marítimo, lacustre ou continental). Outro mecanismo que atua na formação de argilas é a alteração hidrotérmica que causa alterações nas rochas já existentes por meio de fluidos acima da temperatura ambiente (SANTOS, 1989).

Conforme Murray (2007), a determinação das propriedades e até mesmo das possíveis aplicações da argila não depende apenas da composição e estrutura da mesma. Fatores como o ambiente geológico, e a presença de minerais não argilosos acabam exercendo influência em algumas características (SANTOS, 1989).

3.1.1 Classificação das argilas

A grande variedade de argilas com inúmeras características distintas, cria enormes dificuldades quando se trata de classificá-las. Para tanto, ao longo dos anos houve vários sistemas de classificação que consideraram alguma característica específica como, por exemplo, origem do depósito e o uso industrial, gerando classificações como caulim inglês e argila refratária, respectivamente (SANTOS, 1989).

Virta (1992), apresenta um sistema de classificação estruturado a partir do uso industrial de cada argila, sendo: argilas plásticas para cerâmicas brancas (*ball-clays*), argilas usadas para a indústria de refratários (*fire clays*), argilas comuns para cerâmicas vermelhas (*common clays*), argilas bentonitas (*bentonite clay*), argilas caulinitas (*kaolinite clay*) e terra fuller (*fuller's earth*).

As argilas plásticas possuem origem sedimentar, apresentando em sua composição caulinita, mica, sericita, e matéria orgânica (VIRTA, 1992). Este tipo de argila apresenta uma alta plasticidade juntamente com uma granulação fina (VIRTA, 1992; MURRAY, 2007; SANTOS, 1989). Confirmando sua origem sedimentar, Murray (2007), afirma que esta argila ocorre em lagos e/ou deltas na forma de lentes.

Argilas refratárias são bastante utilizadas em materiais refratários, tendo sua origem sedimentar ou residual. Muitos depósitos são encontrados abaixo de camadas de carvão (SANTOS, 1989; VIRTA, 1992). A composição das argilas refratária em sua maioria é do argilomineral caulinita com alto teor de alumínio, o que em grande parte contribui para a sua refratariedade e a faz resistir a grandes temperaturas (MURRAY, 2007).

As argilas comuns são formadas pela consolidação de silte, argila, folhelhos, ritmitos, sedimentos consolidados e inconsolidados apresenta uma alta plasticidade (VIRTA, 1992; CABRAL JUNIOR *et al.*, 2008). A argila comum possui em sua composição uma grande quantidade de caulinita em maioria com quantidades menores de illita e/ou clorita (MURRAY, 2007).

Este tipo de argila é usada na fabricação de cerâmicas vermelhas (telhas, tijolos e ladrilhos). A temperatura de queima ocorre entre 800 a 1200 °C e apresenta uma cor de queima vermelha associada a porcentagem de ferro (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2008).

As argilas bentonitas são compostas em sua maioria por minerais do grupo esmectita em especial montmorillonita, sendo que as mesmas expandem seu volume na presença de água. As mesmas podem ser classificadas em função da granulometria e da dilatação (VIRTA, 1992).

Santos (1989), afirma que as argilas bentoníticas possuem sua formação atrelada à

alteração de cinzas vulcânicas. As argilas bentonitas possuem as mais diversas aplicações, como: pelletização de minério de ferro, impermeabilização de bacias e uso em perfuração de poços de petróleo. (LUZ *et al.*, 2008).

As argilas caulínicas são compostas em maioria por caulinita, embora ocorram pequenas variações na sua composição (LUZ *et al.*, 2008). Essa argila se forma em depósitos residuais nos quais é originada a partir da alteração da rocha matriz, a qual gera também os depósitos secundários chamados de sedimentares, formados através do transporte e deposição do material (MORAES, 2006).

Para Wilson *et al.* (1998), os caulins brasileiros podem ser classificados nos seguintes grupos: sedimentar, derivados de pegmatitos, derivados de rochas vulcânicas, derivados de rochas graníticas e derivados de anortosito. O caulim possui impurezas como quartzo, mica, illita, que após o beneficiamento são removidas, potencializando suas propriedades, como, brancura, opacidade, brilho e viscosidade (MURRAY, 2007).

Os principais usos do caulim são para a indústria do papel como cobertura e como elemento de carga. Entretanto, o caulim também pode ser usado nas indústrias de cerâmica, fibra de vidro, tintas e borracha (MORAES, 2006).

As argilas terra fuller ou *fuller's Earth* são compostas por atapulgita com presença de montmorillonita, a mesma possui alto teor de magnésio. A principal aplicação dessa argila é a purificação de óleos (VIRTA, 1992). Segundo Murray (2007), *fuller's earth* se trata de um termo genérico associado a argilominerais e argilas usadas na absorção e adsorção de fluídos. Além da atapulgita, se destacam a sepiolita e as esmectitas.

3.1.2 Argilominerais

De acordo com Guggenheim e Martin (1995), são definidos como argilominerais o grupo dos filossilicatos e qualquer outro mineral que consiga proporcionar plasticidade a argila e dureza após procedimentos de queima ou cozimento.

Comumente confundidos com as argilas, os argilominerais apresentam algumas características que não são encontradas nas mesmas, tais como: possibilidade de origem sintética e ausência de granulometria como critério de classificação (BERGAYA; LAGALY, 2013). Enquanto que para Klein e Dutrow (2012), as distinções entre argila e argilomineral se encontram nos critérios de definição, a argila só leva em consideração os critérios granulométricos, enquanto que os argilominerais levam em consideração os critérios composicionais e granulométricos.

As propriedades físicas e químicas dos argilominerais estão atreladas a sua composição e estrutura (MURRAY, 2007). Um exemplo, tanto da aplicação industrial como da composição e a estrutura está relacionada às pesquisas de petróleo, no qual alguns argilominerais são fortes indicadores de áreas petrolíferas (SUGUIO, 2003).

Deer W. A. *et al.* (2013) afirma que: "A composição dos argilominerais varia de acordo com a extensão e o grau de substituição dos elementos silício (Si), alumínio (Al) e magnésio (Mg) por outros cátions, a natureza e a quantidade dos cátions intercalados, e o conteúdo de água presente".

Wesley (2014) classifica os argilominerais com base na composição mineralógica em quatro grupos principais, sendo eles: caulinita, montmorillonita, illita e halozita, porém, Deer W. A. *et al.* (2013), diverge desta classificação no último grupo, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos Argilominerais

Grupos	Constituintes	Fórmula Química Geral
Caulinita	Caulinita, Haloisita, Dickita e Nacrita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Illita	Illita, Brammalita	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$
Esmectita	Montmorillonita, beidellita, Nontronita, Hectorita, Saponita, e Sauconita	$M_x(Al_4 - xMg_x)Si_8O_{20} - (OH)_4$
Vermiculita	Vermiculita	$(MgFe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2.4H_2O$

Fonte: Adaptado de Deer W. A. *et al.* (2013)

Santos (1989), classifica os argilominerais em dois grupos. Com estruturas lamelares e com estruturas fibrosas. O primeiro é o mais abundante e subdivide-se em dois grupos denominados diofórmicos (1:1) e trifórmicos (2:1). Por outro lado os argilominerais com estrutura fibrosa se divide em sepiolita e atapulgita.

O grupo dos lamelares podem ser classificados com base em propriedades estruturais, são eles afastamento basal (se apresentam estrutura 1:1 ou 2:1), grau de substituição das camadas que o constitui, capacidade das camadas se expandirem na presença de moléculas polares e arranjo cristalográfico, este último determina o grupo em que cada argilomineral pertencerá.

3.2 Caracterização química

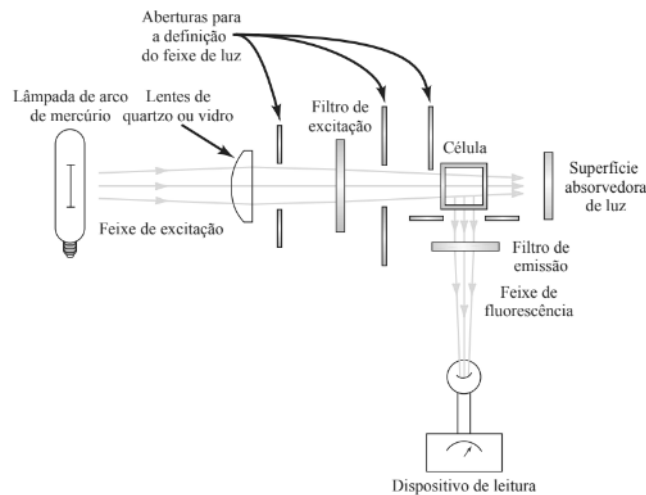
A composição e as fases cristalinas são parâmetros fundamentais para caracterização de solos, sedimentos e argilas (SCAPIN, 2003). A identificação e o entendimento das propriedades dos diferentes minerais do solo ajudam na avaliação da sua gênese e nas propriedades relacionadas com a classificação (PICCOLI *et al.*, 2009).

3.2.1 Fluorescência de Raios X

De acordo com Klein e Dutrow (2012), a fluorescência diferentemente da difração nos permite obter a composição química da amostra. A técnica ocorre com a medição das intensidades dos Raios X, onde cada elemento absorve uma parcela desses raios e cada um deles gera um espectro de emissão característico que permite sua identificação. Para Scapin (2003), a fluorescência possui uma alta precisão e uma alta exatidão.

A fluorescência é uma técnica na qual não ocorre a destruição da amostra e que permite a identificação dos elementos químicos e sua quantidade (SANTOS; TEXEIRA, 2017). Na Figura 7 é exibido um modelo simplificado de como o ensaio é feito.

Figura 7 – Modelo simplificado do ensaio de fluorescência de raios X



Fonte: Adaptado de Skoog *et al.* (2006)

3.3 Caracterização Física

A caracterização física se faz necessária para entendermos aspectos importantes da composição dos solos, tal como a granulometria, densidade e os índices de plasticidade.

3.3.1 Granulometria por peneiramento

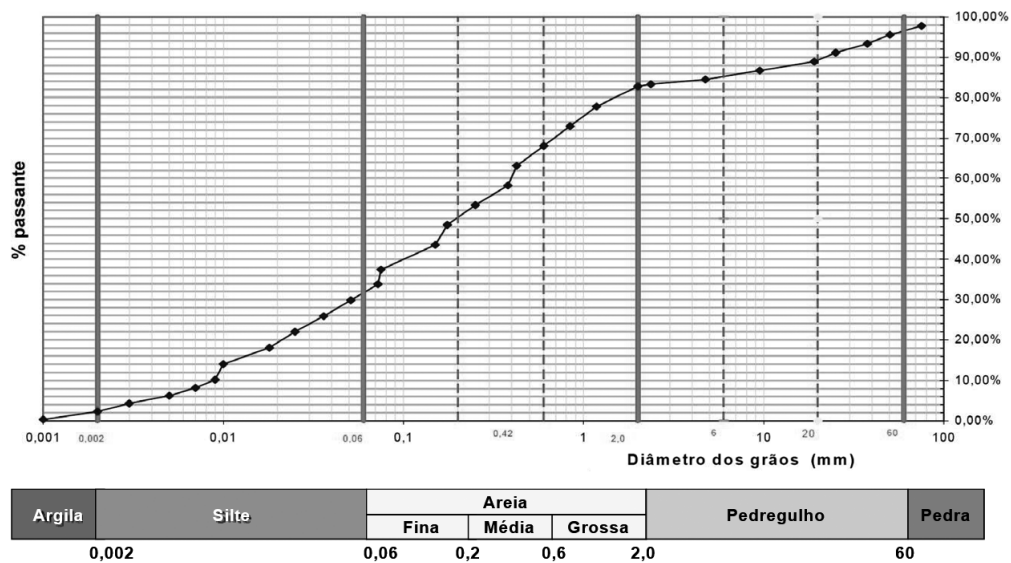
A determinação das faixas granulométricas é realizada seguindo uma série de malhas de peneiras que mantêm uma relação constante entre si, enquanto que as aberturas das peneiras, são relacionadas ao número de malhas, que de maneira simples é o número de aberturas contidas em uma polegada (CORREIA; COUTO, 2018).

Com o uso da técnica, mesmo sem um padrão de aberturas das telas, a indústria conseguiu estabelecer especificações baseadas em ensaios. Um dos padrões estabelecidos é o da série Tyler, fruto de aperfeiçoamento de outras séries (SAMPAIO; SILVA, 2007).

De acordo com Sampaio e Silva (2007), o peneiramento a seco é mais indicado a material grosseiro enquanto que para material mais fino é indicado o peneiramento a úmido. O uso de água neste último é atribuído para facilitar a passagem do material fino pela tela (CORREIA; COUTO, 2018). Mas, de acordo com a norma NBR 7181 (2018), tanto o peneiramento grosso como o peneiramento fino é realizado a seco.

Após o peneiramento, é obtido dois produtos, o material retido na tela da peneira é denominado de oversize e o passante é o undersize (CORREIA; COUTO, 2018). A interpretação dos dados obtidos é feita através de gráficos (Figura 8), a partir dos quais é determinada a granulometria do material estudado.

Figura 8 – Representação da curva granulométrica



Fonte: Solos (2011)

3.3.2 Granulometria por sedimentação

As técnicas de análise granulométrica que aplicam a Lei de Stokes se baseiam na velocidade terminal de sedimentação das partículas em um meio aquoso, sendo válida para regime laminar (LIMA; LUZ, 2001).

O princípio da lei de Stokes (Equação 3.1) determina a variação da velocidade de queda de uma partícula em um fluido em função do seu diâmetro, pois o movimento de uma

partícula em um fluido acontece por meio de forças gravitacionais e forças resistivas, sendo que, quando estas forças se equilibram, a partícula atinge uma velocidade terminal e ocorre a sedimentação a uma taxa constante (LIMA; LUZ, 2001).

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD_p^2}{18\mu} \quad (3.1)$$

Onde:

- ρ_s massa específica do sólido.
- ρ_f massa específica do fluido.
- v é a velocidade terminal da partícula.
- D_p é o diâmetro da partícula.
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido.
- g é a aceleração da gravidade.

Sendo assim, observa-se que a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional ao tamanho da partícula e da sua massa específica, porém inversamente proporcional a viscosidade do fluido. Dessa forma, a lei de Stokes pode ser usada para se obter o tamanho das partículas em virtude do tempo que esta percorre uma distância conhecida durante a sedimentação (SAMPAIO; SILVA, 2007).

Algumas das técnicas que se baseiam na velocidade terminal de sedimentação são béquer de sedimentação, pipeta de Andreasen e sedigraph. Destaca-se que essas técnicas devem ser aplicadas somente para materiais puros ou para materiais que contenham fases, cujas densidades são muito próximas. Além disso, válida somente para número de Reynolds menor que 0,2, ou seja, aplica-se somente para a região de fluxo laminar (LIMA; LUZ, 2001).

3.3.3 Índices de Consistência

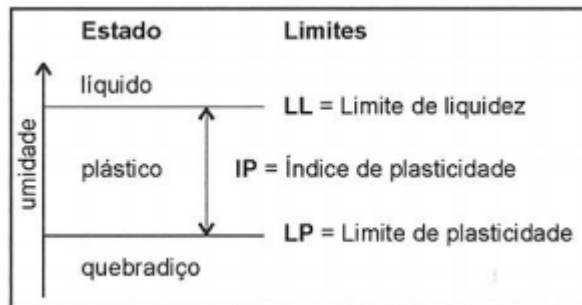
De acordo com Pinto (2016), somente a distribuição granulométrica não é o suficiente para a descrição do comportamento de um solo. Em se tratando de argilas isso é ainda mais importante, pois partículas de granulometria fina possuem uma grande superfície específica. Tais partículas, na presença da água fazem com que o comportamento se torne imprevisível. Com relação as argilas esse efeito está atribuído aos argilominerais que a compõem, assim como os íons adsorvidos.

Para tanto, Atterberg desenvolveu um método para descrever a consistência de solos

com grãos finos que possuem teor de umidade variável (DAS, 2007). Os limites de consistência baseiam-se no fato de que o solo argiloso muda de fase conforme o teor de umidade aumenta ou diminui. Quando o solo apresenta grande quantidade de água, ele está no estado líquido e se comporta como tal, caso a água seja perdida o mesmo muda de estado e apresenta comportamento quebradiço e quando não se encontra nesses dois extremos o solo está no estado plástico.

É importante ressaltar que a transição entre esses estados ocorre de maneira lenta e gradual (PINTO, 2016). A Figura 9 ilustra a mudança de estado do solo em função do teor de umidade, assim como os referidos limites.

Figura 9 – Índices de consistência



Fonte: Adaptado de Pinto (2016)

Ainda na Figura 9, é possível identificar que estados dos solos são separados por dois limites, são eles: limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) e entre eles há a região de plasticidade com o índice de plasticidade (IP).

O limite de liquidez (LL) "é definido como o teor de umidade com o qual é possível fechar uma ranhura feita no solo com apenas 25 golpes" conforme (PINTO, 2016). Enquanto que o limite de plasticidade de acordo com (DAS, 2007) "é definido como o teor de umidade para o qual o solo se esboroa, quando rolado em fios de 3,2 mm de diâmetro". E por fim, têm-se, o índice de plasticidade que é obtido através da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (NBR 6502, 1995).

3.3.4 Densidade

É um dos meios utilizados na identificação de minerais, determinado pela razão entre a massa e o volume. A densidade, pode ser apresentada de duas formas: densidade real e a densidade aparente. A principal diferença entre elas é que na densidade real o volume é somente das partículas e não leva em consideração os espaços vazios enquanto que na densidade aparente

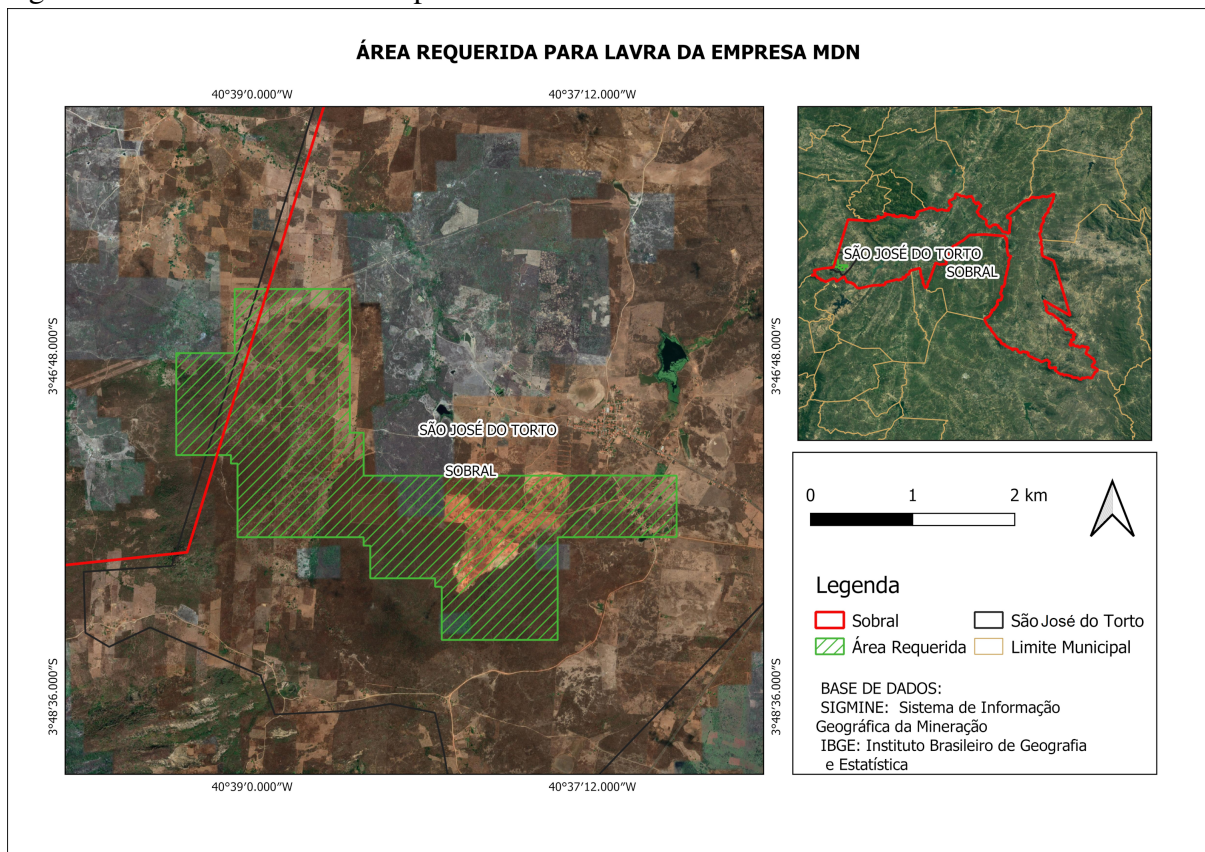
considera-se o volume total, ou seja, o volume das partículas e dos vazios presentes (SAMPAIO; SILVA, 2007). O método de fácil utilização para determinação da densidade de partículas é a picnometria a líquido, a qual utiliza uma balão de fundo achatado conhecido como picnômetro.

3.4 Mineração Do Nordeste

A Mineração do Nordeste (MDN) é uma empresa de mineração que, atualmente, realiza a extração de minério de ferro no Acesso Fazenda Angustura, no distrito de São José do Torto, Sobral, Ceará. A área de processo minerário 800.072/2005, que hoje está em posse da empresa, teve as pesquisas iniciadas no ano de 2005 pela empresa Coreáú calcário LTDA. Esta, por sua vez, cedeu a área em questão em 2012. A empresa conta com outros 16 alvarás de pesquisa na região.

A ocorrência do minério está centrado em colúvios e elúvios próximos ao maciço, associado com a argila em toda a extensão do depósito. A área destinada para lavra conta com 667,97 hectares. A Figura 10 mostra a área de lavra atual da empresa.

Figura 10 – Área de lavra da empresa MDN.

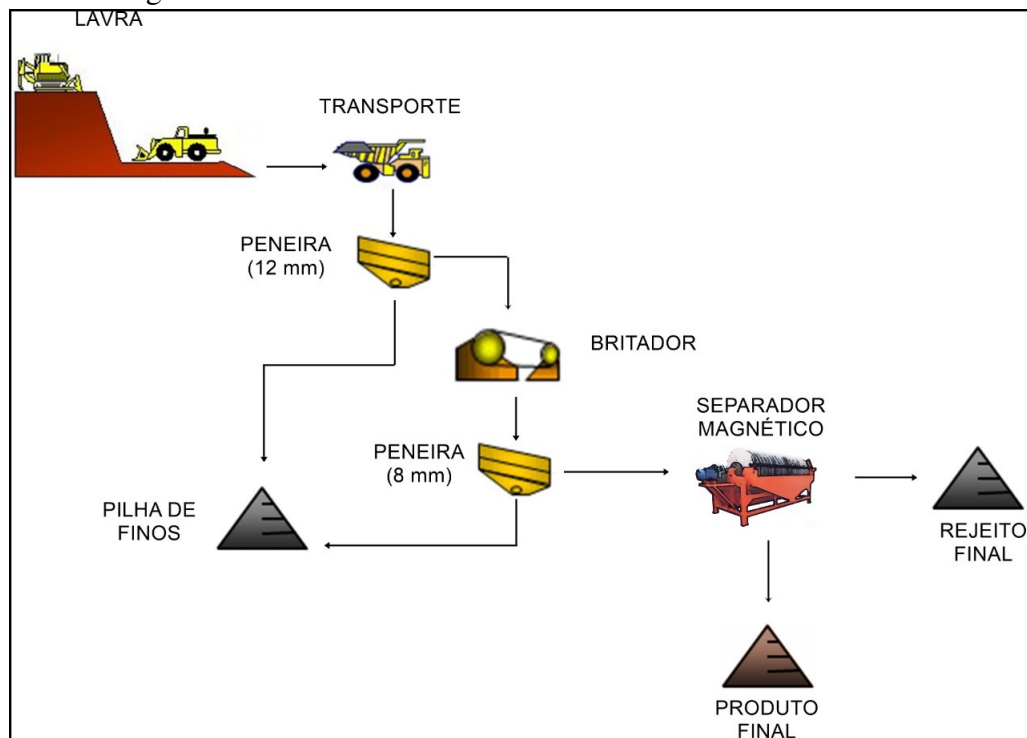


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O fluxograma de lavra e beneficiamento do minério de ferro extraído pela MDN é descrito na Figura 11. A extração ocorre de maneira mecanizada por meio de retroscavadeiras responsáveis pelo carregamento dos caminhões. O beneficiamento é realizado a seco em uma planta móvel. Nesta, o processo ocorre com alimentação do material em uma peneira de 12 mm. O passante deste material é armazenado em uma pilha de finos enquanto que o retido segue para a fase de britagem. Posterior a britagem, o material passa por uma peneira de 8 mm, sendo que o retido segue para uma etapa de separação magnética por tambor (MAG), enquanto o passante segue para a pilha de finos.

O concentrado do separador magnético possui teor de 64,5% de ferro, Torna-se importante destacar que o processo apresentado gera bons resultados durante o período de seca. Nos períodos de chuva, que vão de janeiro a maio, a grande quantidade de argila presente no depósito causa a diminuição do teor do concentrado, devido à alta umidade presente na alimentação, inviabilizando o processo.

Figura 11 – Fluxograma de Beneficiamento da MDN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.5 Aplicações na indústria

As argilas são uma das mais importantes matérias-primas na indústria, possuindo aplicações na agricultura, engenharia, geologia, construção e processos industriais (DOMINGUEZ *et al.*,).

Uma das aplicações das argilas mais conhecida é a produção de materiais cerâmicos. Para Rocha *et al.* (2014), a argila desenvolve um papel importante como matéria-prima para produção de peças artesanais e industriais. A argila quando adicionada de água possibilita ser moldada como o desejado e quando seca fornece uma boa resistência térmica e mecânica (MUKHERJEE, 2013). Um dos segmentos de produção é a cerâmica vermelha, sendo a argila comum a matéria-prima para materiais, como: telhas, tijolos e blocos (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2008). Se tratando de cerâmicas brancas, as argilas do tipo ballclay são utilizadas na fabricação de porcelana, placas cerâmicas, porcelana elétrica entre outros (LUZ; LINS, 2008).

As argilas são utilizadas na agricultura como corretivos do solo. Segundo Luz e Lins (2008), quando as argilas possuem em sua composição sepiolitas e atapulgitas apresentam propriedades físico-químicas quando misturadas com água, que possibilitam a sua aplicação como carreador e agente suspensor de fertilizantes, tinta, adesivos e defensivos agrícolas. De acordo com Mukherjee (2013), as vermiculitas contribuem para a retenção de água no solo.

Na engenharia geotécnica as argilas também possuem aplicações importantes, como na produção de fluidos de perfuração. Neste caso, o uso da argila faz com que o fluido desenvolva propriedades como uma densidade e viscosidade desejada (MUKHERJEE, 2013). Portanto, a bentonita possui as seguintes funções no fluido de perfuração: resfriamento e lubrificação da broca, redução do atrito entre a coluna de perfuração e as paredes do furo e aumento de viscosidade auxiliando na retirada de partículas de dentro do furo (LUZ; LINS, 2008). Outro uso bastante conhecido da bentonita é na pelotização do minério de ferro.

Na indústria do papel a argila é comumente utilizada como carga, ou como tinta como revestimento dos papéis. A argila utilizada neste tipo de indústria é a caulinita, pois esta possui características como brancura, tamanho do grão, baixa abrasividade (MUKHERJEE, 2013). Além destas características mencionadas Murray e Kogel (2005) ressaltam outras propriedades como viscosidade baixa, ser um material sem toxicidade e dispersável em água.

Na indústria de fármacos as argilas são bastante utilizadas e desempenham um papel importante. Os minerais deste segmento necessitam apresentar características físicas e químicas, como: absorção de ácidos, reologia, adsorção e outros fenômenos de superfície, sendo

que as argilas possuem propriedades de superfície que são interessantes para esta indústria (CARRETERO; POZO, 2009; MUKHERJEE, 2013). As argilas utilizadas nesta indústria são regulamentadas por organizações de saúde que decidem as especificações de segurança quem devem ser disponibilizadas na comercialização, no caso da argila informações como uso, toxicidade, perigo, armazenamento, propriedades físicas e químicas (LÓPEZ-GALINDO *et al.*, 2007).

Além disso, as argilas também podem ser consideradas um material verde, pois muitas destas possuem aplicações ao meio ambiente, sendo utilizadas para remoção de metais pesados, remoção de compostos orgânicos, dessanilização e derramamento de óleos (LUZ; LINS, 2008). Um exemplo desta aplicação ambientalmente correta é apresentado por Ferreira *et al.* (2007), com utilização de argilas sintéticas para a remoção de corantes da água de indústrias têxteis possibilitando o reuso da água. A Tabela 3 mostra algumas das principais aplicações das argilas.

Tabela 3 – Usos das argilas

Argilas	Aplicações
Argilas caulim	porcelana, cerâmica, aditivo para papel, borracha, refratários, plásticos, catalisador, cimento, cosméticos
Bentonita	fertilização e correção de solos, fluido de perfuração, pelletização, aglomerante, impermeabilização de bacias
Terra Fuller (Fullers earth)	Absorvente, clarificação, descolorimento e absorção de óleos, aditivo de alimentação animal, carreador de fertilizante
Argilas Plásticas	Sanitários, isolantes elétricos, cerâmica branca, porcelana de revestimento
Argilas comuns	blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos, tubos e ladrilhos
Argilas Refratárias	isolantes, peças refratárias no geral

Fonte: Adaptado de Luz e Lins (2008), Klein e Dutrow (2012), Murray (2007)

4 METODOLOGIA

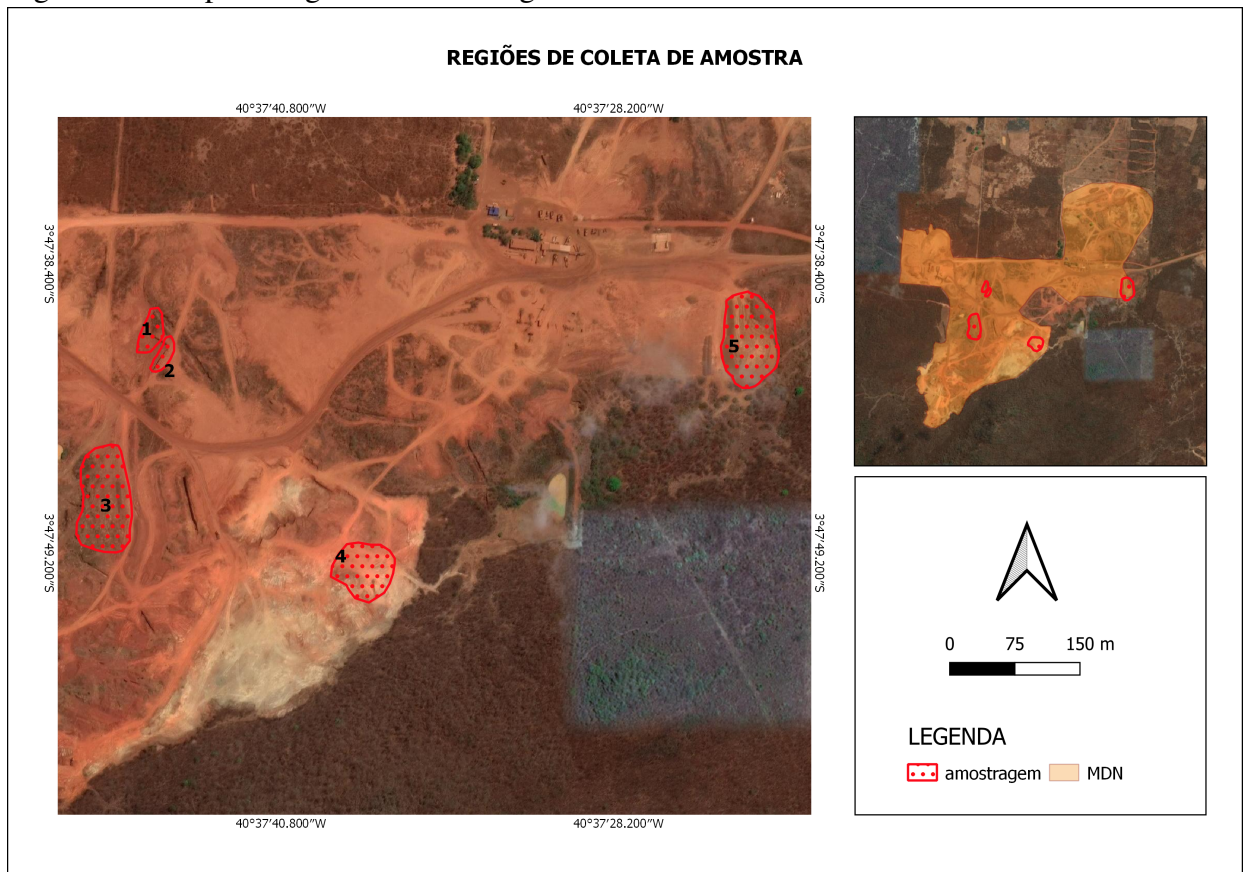
Neste capítulo são descritos a metodologia utilizada para a realização dos ensaios. Os métodos escolhidos se baseiam em conhecer as propriedades físicas e químicas do material.

4.1 Amostragem

Para escolha dos pontos de amostragem foi realizada uma análise da área e reconhecimento de zonas onde as características visuais das argilas fossem predominantemente as mesmas. Com o auxílio e orientações de representantes da empresa foram escolhidos pontos em áreas a serem lavradas, frentes de trabalho interrompidas devido à presença de argila e pilhas de estéril. Em virtude da dificuldade de locomoção e do tempo disponível, foram definidas cinco regiões de amostragem, conforme a Figura 12.

O procedimento de amostragem aconteceu da seguinte forma: registro fotográfico da região amostrada, coleta das coordenadas no GPS de navegação Garmin, a coleta da amostra com o auxílio de pá metálica e a armazenagem da amostra em saco plástico.

Figura 12 – Mapa de regiões de amostragem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.2 Preparação da amostra

A preparação das amostras foi realizada de acordo com a NBR 6457 (2016), no Laboratório de Geologia da UFC em Crateús. De acordo com a norma, as amostras foram submetidas a secagem ao ar livre por um período de 24 horas e, posteriormente, desmanchados os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneização da amostra.

O quarteamento foi realizado em pilha cônica, da forma sugerida por Sampaio e Silva (2007), para retirada de alíquotas destinadas a caracterização física, química e mineralógica.

4.3 Caracterização química

4.3.1 Fluorescência de Raios X

A análise química foi realizada pela empresa, utilizando a técnica de fluorescência de raios X.

4.4 Caracterização Física

A descrição das amostras, foram realizadas no laboratório de Geologia da Universidade Federal do Ceará em Crateús de acordo com o manual técnico de pedologia produzido pelo IBGE (2007). As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Ceará em Fortaleza e seguiram as normas técnicas: NBR 7181 (2018), para determinação da granulometria, NBR 6459 (2017), para a determinação do limite de liquidez, NBR 7180 (2016) para a obtenção limite de plasticidade e a NBR 6457 (2016), para a determinação da umidade. A determinação da densidade ocorreram de acordo com DNER 93 (1994).

4.4.1 Descrição das amostras

A descrição das amostras é uma etapa importante, pois fornece informações iniciais a respeito do material estudado, além de uma ambientação mais adequada com o meio no qual a amostra está inserida, tais informações obtidas na descrição visual das amostras podem vir a se mostrar divergentes em comparação com ensaios mais aprofundados, mas ainda são de grande ajuda para a caracterização das amostras. Neste trabalho foram realizados os seguintes ensaios: grau de consistência a seco e a úmido, plasticidade de campo e pegajosidade. Para a realização dos ensaios utilizou-se o manual técnico de pedologia, produzido pelo IBGE (2007).

O ensaio de grau de consistência resumiu-se em qualificar as forças físicas atuantes no material à medida que o teor de umidade varia. O ensaio de consistência a seco traduziu-se em comprimir um torrão seco utilizando o polegar e o indicador, podendo este ser classificado em: solta, macia, ligeiramente dura, dura, muito dura, extremamente dura, sendo solta a classificação não se faz coerente uma vez que o material não está agregado e extremamente dura a definição em que o torrão não pode ser quebrado com as mãos. O ensaio de consistência a úmido ocorre de maneira similar ao de consistência a seco, com a diferença na umidade do torrão e na classificação, podendo ser classificado em: solta, muito friável, friável, firme, muito firme, extremamente firme, sendo classificada de solta a extremamente firme em função da pressão aplicada e da resistência do material em romper-se.

A plasticidade de campo foi realizada por meio da tentativa de confecção de um cilindro com o material, tal cilindro foi feito rolando o material entre o dedo indicador e polegar, com o objetivo de chegar nas especificações de 4 cm de comprimento, e com relação ao diâmetro (2 mm, 4 mm e 6 mm), a medida em que ficam menores, representam uma alta plasticidade, após a confecção do cilindro, quatro resultados se mostraram possíveis, são eles: não plástico quando nenhum cilindro se forma, ligeiramente plástico quando somente o diâmetro de 6 mm é alcançado, plástico quando é alcançado o diâmetro de 4 mm e muito plástico quando o diâmetro de 2 mm é atingido.

No ensaio de pegajosidade é determinado a capacidade que o material possui em aderir aos objetos, a amostra foi molhada, homogeneizada e foi comprimida entre o polegar e o indicador, posterior a isso a aderência foi observada, este ensaio apresenta quatro graus de pegajosidade, são eles: não pegajosa quando nada da amostra se aderiu, ligeiramente pegajosa quando a material nos dois dedos porém sem alongamento e esticamento, pegajosa quando o material aderiu-se aos dedos e apresenta uma alongamento pequeno e muito pegajosa quando o material aderiu aos dedos fortemente e possui um grande alongamento.

4.4.2 Análise Granulométrica

A NBR 7181 (2018), estabelece a metodologia para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por combinação do peneiramento e sedimentação. A seguir, são descritos os pontos principais para realização dos ensaios.

Inicialmente, a amostra foi peneirada na peneira de 2 mm, para separação da fração grossa da fina. A fração retida na peneira foi destinada para o peneiramento grosso e a fração

passante para o peneiramento fino e sedimentação. foi separada cerca de 70 gramas destinado a sedimentação e 100 gramas para a determinação da umidade higroscópica.

O material foi levado a um béquer e misturado com hexametáfosfato de sódio agindo com defloculante. Após isso, o material foi agitado até estar imerso e deve ser deixado em repouso em 12 horas. Passado este tempo, o material foi vertido no copo de dispersão, sendo o restante preenchido com água e submetido ao dispersor por 15 minutos. Após o tempo no dispersor o material foi transferido para a proveta, e esta é completada com água até o volume de um litro.

Com temperatura constante a proveta foi agitada com uma baqueta de vidro para manter o material em suspensão. Ao atingir a temperatura de equilíbrio, foi tampada a proveta com a mão e realizado movimentos sucessivos, virando a boca da proveta para cima e para baixo por um minuto. Após isso, foram realizadas as leituras com o densímetro nos tempos de 30, 60 e 120 segundos. Caso o material não seja realizado a temperatura constante, a proveta deve ser colocada em banho até o fim das leituras, sendo realizadas nos tempos de 4, 8, 15, 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Após a última leitura, o material é vertido na peneira com abertura de 0,075 mm. A porcentagem de material em suspensão é dado pela Equação 4.1.

$$Q_s = N x \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{md}} x \frac{V \rho_{wc} (L - L_d)}{\frac{M_w}{100 + W} x 100} \quad (4.1)$$

onde:

- Q_s é a porcentagem de solo em suspensão no momento da leitura.
- V é o volume da proveta.
- N é a porcentagem de material passante na peneira de 2 mm.
- ρ_s é a massa específica dos grãos dos solos.
- ρ_{md} massa específica do meio dispersor na temperatura do densímetro.
- ρ_{wc} é a massa específica da água.
- L é a leitura do densímetro na suspensão.
- L_d é a leitura do densímetro no meio dispersor.
- M_w é a massa do material úmido usado na sedimentação.
- W é a umidade higroscópica do material passante na peneira de 2 mm.

A determinação do diâmetro das partículas é obtido através da Equação 4.2

$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{\rho_s - \rho_{md}} \frac{z}{t}} \quad (4.2)$$

Onde:

- d é o diâmetro das partículas.
- μ é o coeficiente de viscosidade do meio dispersor.
- z é a altura de queda das partículas.
- t é o tempo de sedimentação das partículas.
- ρ_s é a massa específica dos grãos dos solos.
- ρ_{md} massa específica do meio dispersor na temperatura do densímetro.

Para a determinação da granulometria pelo peneiramento fino, o material retido na peneira de abertura de 0,075 mm, foi seco em estufa, e, posteriormente, submetido ao peneiramento a seco, com utilização das peneiras das seguintes aberturas: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. As massas retidas em cada peneira devem ser pesadas, para construção da curva granulométrica.

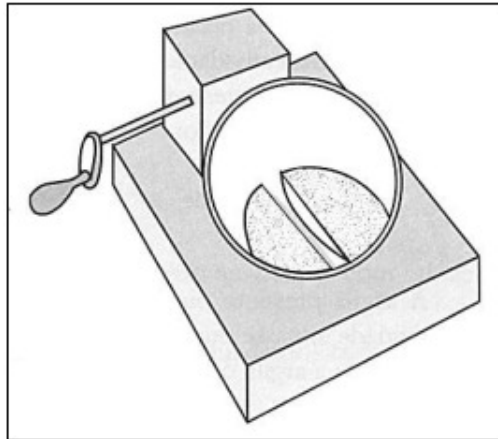
4.4.3 Índices de consistência

A determinação do limite de plasticidade é regida pela NBR 7180 (2016). A preparação da amostra segue o mesmo procedimento para o limite de liquidez, posterior a isso é moldado à mão uma esfera com massa de 10 gramas. Em seguida com o auxílio de uma placa de vidro a esfera será transformada em um cilindro, este processo foi realizado até que o cilindro possua um diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm, caso o cilindro se fragmente antes de atender as especificações deve-se refazer a preparação da amostra. Quando é obtido o cilindro nas especificações o mesmo é retirado para determinação da umidade, este processo deve ser realizado três vezes.

A obtenção do limite de liquidez foi realizada com auxílio da norma NBR 6459 (2017). Inicialmente, após ser realizada a homogeneização a mistura da argila com pequenas quantidades de água, por cerca de 20 minutos até a obtenção de uma consistência pastosa e homogênea. Posteriormente, o material foi moldado na concha do aparelho de casa grande, de modo que não ocorra a formação de bolhas. Com o auxílio de um cinzel ocorreu a divisão da massa, causando uma ranhura, conforme Figura 13. Em seguida, a concha foi golpeada contra a base por meio do giro de uma manivela, com duas voltas por segundo. O ensaio continuou

até que a distância entre o material seja de 13 mm. A coleta para determinação da umidade foi realizada nas bordas que se juntaram onde antes havia a ranhura. Por fim, foi construído um gráfico golpes x umidade, e a umidade do material é a que corresponde a 25 golpes.

Figura 13 – Representação do ensaio de limite de liquidez.



Fonte: Pinto (2016)

É considerado um valor satisfatório quando a umidade das amostras não diferem 5% da média da umidade. Caso não seja possível a realização do cilindro nas medidas indicadas o material é considerado sem plasticidade. Com os valores de limite de liquidez e limite de plasticidade é possível determinar o índice de plasticidade, como mostra a Equação 4.3.

$$IP = LL - LP \quad (4.3)$$

Onde:

- IP é o Índice de Plasticidade.
- LL é o Limite de Liquidez.
- LP é o limite de Plasticidade.

A obtenção da umidade é de fundamental importância para a determinação dos índices de consistência do material. Esta é regida pela NBR 6457 (2016), que diz que o material deve estar em sua umidade natural para realização do ensaio. Posteriormente, foi realizado o destorroamento e homogeneização seguindo por peneiramento com abertura de 0,42 mm e obtenção da massa de 200 gramas constituídas para a realização do ensaio. Em seguida, o material foi disposto em uma cápsula e coberto por uma tampa, este conjunto passa pela pesagem, após obtido o peso é retirada a tampa e a cápsula juntamente com o material seguirá para a estufa com a temperatura variando entre 105°C a 110°C permanecendo por um intervalo entre 16 e 24 horas. Após o período de secagem a cápsula é retirada e colocada no dessecador até

que seja atingida a temperatura ambiente, 'posterior a isso é recolocada a tampa e o conjunto é pesado novamente. Este procedimento deve ser realizado três vezes por amostra. A umidade será determinada pela Equação 4.4.

$$W = \frac{M1 - M2}{M2 - M3} \times 100 \quad (4.4)$$

Onde:

- W é o teor de umidade.
- M1 é a massa da amostra úmida juntamente com a do recipiente em gramas
- M2 é a massa da amostra seca juntamente com a do recipiente em gramas
- M3 é a massa do recipiente (capsula metálica e tampa ou vidro relógio e grampo) em gramas

4.4.4 Densidade

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNER 93 (1994), que estabelece que os picnômetros foram pesados inicialmente vazios (A1), posterior a isso, o mesmo é adicionado uma massa de aproximadamente 10 gramas e novamente pesado (A2). Em seguida, foi adicionado água destilada no picnômetro, de maneira que a água cubra o material, posteriormente, os picnômetros foram levados ao fogo para aquecer por cerca de 15 minutos, com o objetivo de se retirar o ar presente entre as partículas. Após o tempo de fervura, esperou-se esfriar em temperatura ambiente e em seguida, os picnômetros são preenchidos com água destilada e pesados (A3), e por último é obtida o peso dos picnômetros com água destilada (A4). Com os valores em mãos, o cálculo da densidade é descrito por meio da Equação 4.5.

$$ds = \frac{(A2) - (A1)}{(A4 + A2) - (A1 + A3)} \quad (4.5)$$

onde:

- ds = densidade dos sólidos
- A1= massa do picnômetro
- A2= massa do picnômetro + amostra
- A3= massa do picnômetro + água + amostra
- A4= massa do picnômetro + água

O valor de densidade foi a média de pelo menos de dois ensaios considerados satisfatórios quando a variação entre eles for menor que 0,009. Logo após, a obtenção da densidade a mesma é submetida a fatores de correção para que esta apresente um valor de densidade para a temperatura de 20°C.

4.5 Estudo de possíveis aplicações

Foi realizado um levantamento bibliográfico utilizando os sites de busca de trabalhos científicos, considerando que os estudos sejam sobre aplicações com argila e tenham no mínimo dois ensaios que foram realizados neste trabalho. A seleção dos textos foi feita, em conformidade com o assunto proposto, sendo excluídos os estudos que, apesar de constarem no resultado da busca, não apresentaram dados relevantes sobre o tema proposto para o estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização, destacando as principais características das diferentes argilas localizadas na área da empresa Mineração do Nordeste. Além disso, são apresentadas possíveis aplicações industriais para estes materiais, tendo como base uma revisão da literatura.

5.1 Características visuais

5.1.1 Amostra 01

A amostra 01 apresenta coloração bastante diferente das demais, de cor amarelada permitindo rápida identificação de sua presença na região de extração. A Figura 14 mostra a região de contato entre a argila e o minério, reforçando a diferença de cor entre os materiais. Destacado em vermelho, estão observadas indícios que o material aparenta uma alta plasticidade. Ao longo dos ensaios percebeu-se que amostra se aderiu às superfícies dos equipamentos com bastante facilidade quando estes estavam com água. Como a coloração deste material se distingue facilmente do minério de ferro, as coletas para composição da amostra foram feitas onde este material surgia dentro daquela região.

Figura 14 – Características do material coletado no ponto 01



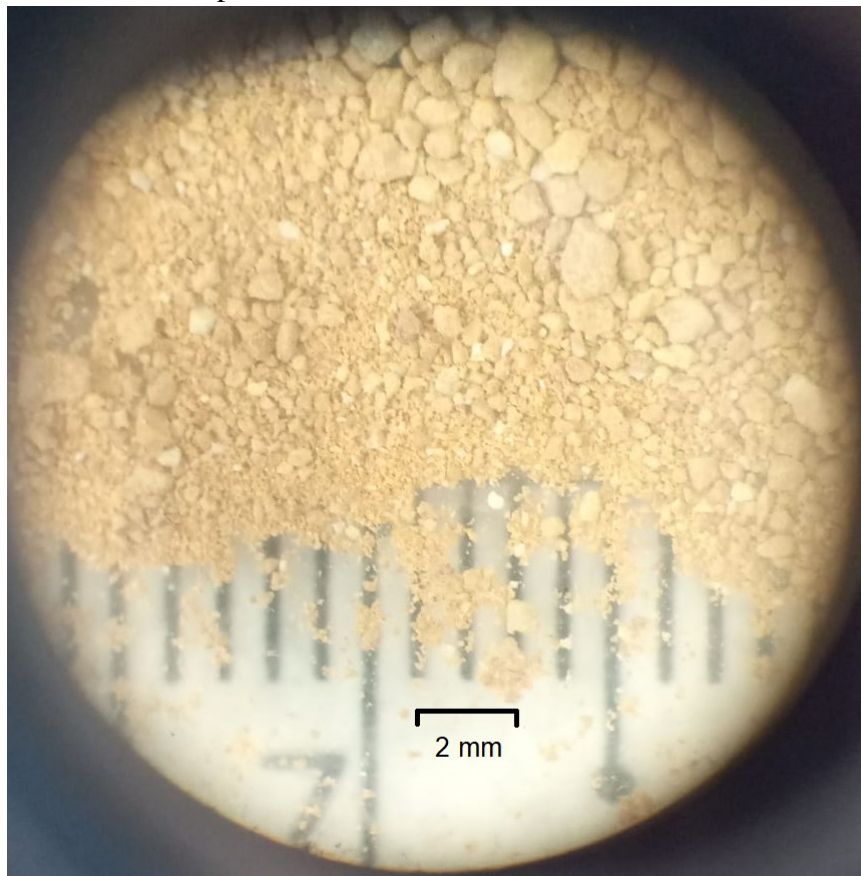
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A amostra 1 apresenta torrões com granulometria média de 2 mm. Em uma análise macroscópica, pode-se perceber a granulometria dos torrões e da porção fina variando de 3

a 4 mm. Na lupa, nota-se grãos bem menores que 1 mm mas também possui torrões com granulometria variando de 1 a 2 mm como é possível observar na Figura 15. As partículas apresentam um formato subangular em sua maioria, porém percebe-se o formato angular em algumas partículas.

Nos ensaios que auxiliam a descrição das amostras, têm-se o grau de consistência medido a seco e a úmido, sendo determinada como dura e firme, respectivamente. Quanto a plasticidade obtida em campo é classificada como plástica e ligeiramente pegajosa, referente ao ensaio de pegajosidade.

Figura 15 – Amostra 01 na lupa com aumento de 10 vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.2 Amostra 02

A amostra 02 foi coletada em um talude na área da exploração da empresa (Figura 16). O material apresenta coloração avermelhada e aparentemente parece possuir uma granulação mais grossa em relação a amostra 1.

Na Figura 16 é possível perceber alguns traços de material de coloração amarelada

semelhantes a amostra 1. Ressalta-se que as amostras 1 e 2 foram coletadas em áreas próximas, sendo possível que seja o mesmo material, mas como a coloração da amostra 2 é predominante vermelha estas foram tratadas de forma separada.

Figura 16 – Características do material coletado no ponto 02

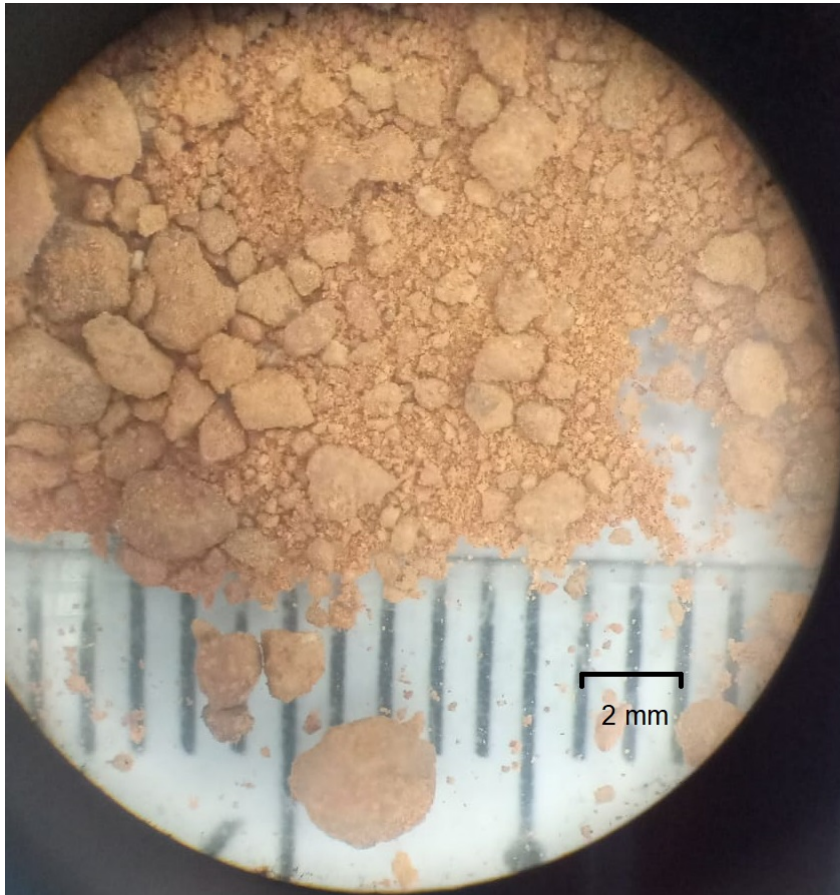


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A olho nu a amostra 2 apresenta torrões com granulação média de 7 mm, porém percebe-se uma variação na granulação dos torrões, com a granulometria variando de 2,5 cm a 3 mm de comprimento em seu eixo maior. Com o auxílio da lupa (Figura 17), nota-se torrões com granulometria variando de 0,5 a 1 mm, sendo perceptível também a variação entre as partículas menores e maiores. Ainda com o auxílio da lupa constata-se que a amostra 2 possui partículas e torrões com formatos angulares e subangulares, sendo possível visualizar a presença de grãos arredondados.

A consistência a seco da amostra 2 é classificada como dura, podendo ser quebrada nas mãos, porém a consistência a úmido é classificada como firme. Quanto a plasticidade determinada em campo a mesma foi classificada como plástica, obtendo o comprimento de 4 cm e um diâmetro de 4 mm, não sendo possível realizar o cilindro com o diâmetro de 2 mm. A pegajosidade foi determinada como ligeiramente pegajosa.

Figura 17 – Amostra 02 na lupa com aumento de 10 vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.3 Amostra 03

A amostra 3 apresenta uma coloração amarronzada, sendo possível perceber um brilho metálico na amostra, podendo estar associado ao minério de ferro. A amostra 3 (Figura 18) foi coletada em uma frente de lavra interrompida.

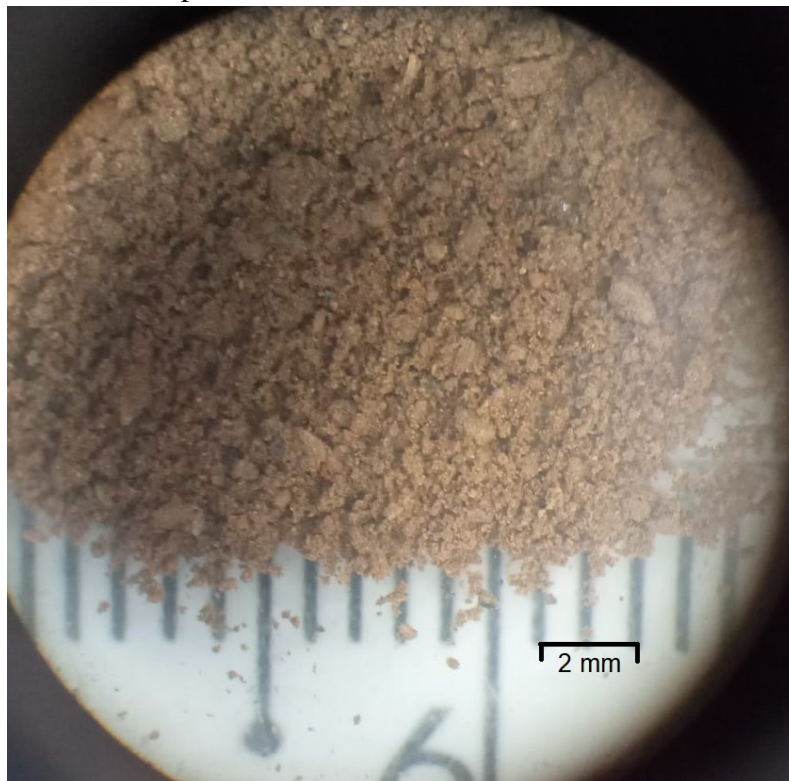
A amostra 3 apresenta uma granulção média de torrão de 7 mm, porém apresenta uma grande variação na sua granulometria variando de 0,5 a 7 mm. Com o uso da lupa (Figura 19), é evidente a presença de grãos menores que 1 mm, mostrando que os grãos finos compõem grande parte da amostra, ainda no material observado na lupa, nota-se alguns torrões com tamanho inferior a 2 mm e com formato subangular. A consistência a seco é classificada como extremamente dura, uma possível explicação para isso é o fato de alta porcentagem de ferro na composição da amostra, já para a consistência a úmido a mesma passa a ser classificada como muito firme. Para a plasticidade de campo, foi classificada como plástica com um corpo de 6 cm e 4 mm de diâmetro. Quanto a pegajosidade a amostra foi determinada como não pegajosa.

Figura 18 – Características do material coletado no ponto 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 19 – Amostra 03 na lupa com aumento de 10 vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.4 Amostra 04

A amostra 4 foi coletada de uma frente de trabalho interrompida (Figura 20). O material apresenta uma granulometria majoritariamente fina, apresentando uma tonalidade amarelada e esbranquiçada em algumas regiões, mas com predominância de tons avermelhados.

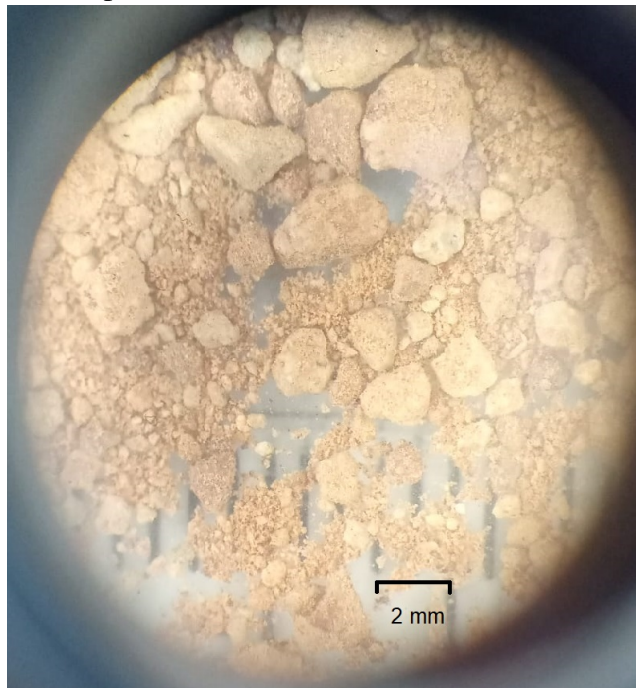
Figura 20 – Características do material coletado no ponto 04



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A amostra 4 apresenta uma granulometria variando de 0,3 a 1 cm a olho nu. Com o auxílio da lupa (Figura 21), a amostra 4 apresenta granulometria média variando de 0,5 a 1 mm, com a presença de grãos muito finos, mas também possui torrões com granulometria acima de 2 mm em relação ao formato dos grãos percebe-se formas angulares e subangulares. A consistência a seco é classificada como extremamente dura e a consistência a úmido foi determinada como firme a determinação da plasticidade de campo é considerada plástica e quanto a pegajosidade a mesma foi classificada como ligeiramente pegajosa.

Figura 21 – Amostra 04 na lupa com aumento de 10 vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.5 Amostra 05

Amostra 5 foi coletada da pilha de rejeito da empresa (Figura 22). A pilha de rejeitos é formada após o material passar pela etapa de beneficiamento e ser retirado o mineral de interesse. O material apresenta uma coloração avermelhada e possui um formato circular, uma vez que passou pelos processos de beneficiamento da empresa.

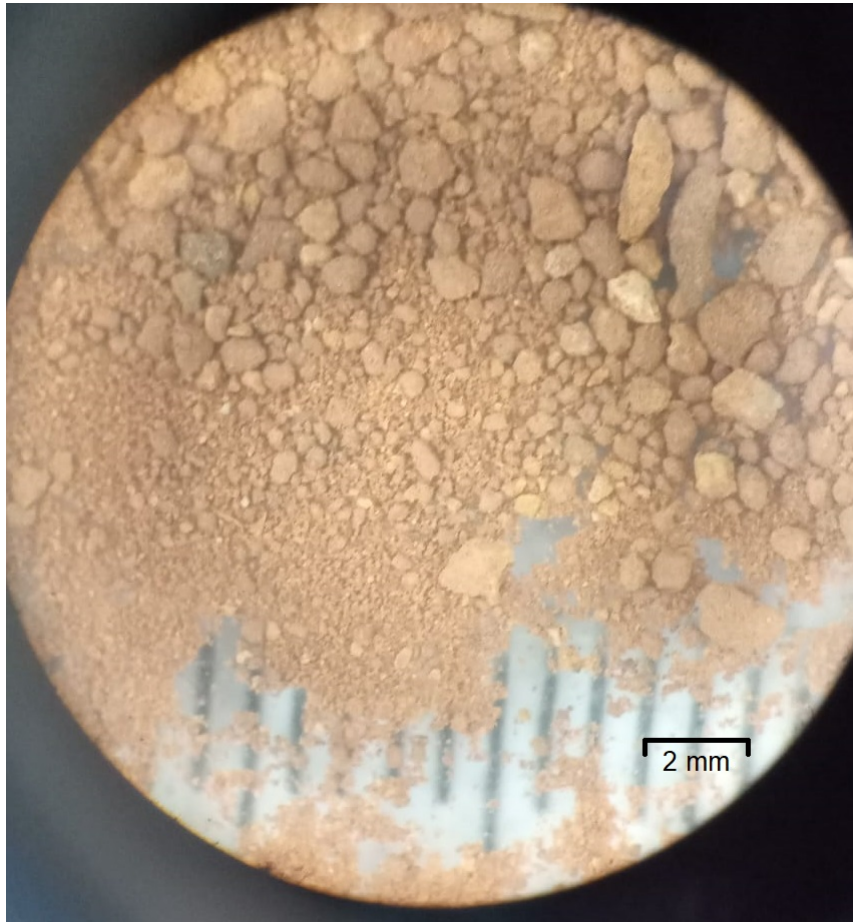
Figura 22 – Características do material coletado no ponto 05



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em análise na lupa, observa-se que os torrões variam a granulometria ente 0,2 a 2,5 cm os grãos apresentam um formato predominantemente semi-arredondados, podendo ocorrer grãos alongados, achatados e angulosos. Na lupa (Figura 23), os grãos menores apresentam arredondamento maior em comparação com os maiores que apresentam formatos alongados e angulosos. A consistência seca e úmida é classificada como extremamente dura e extremamente firme, respectivamente. Quanto a plasticidade aferida em campo e a pegajosidade foram classificadas como plástica e ligeiramente pegajosa.

Figura 23 – Amostra 05 na lupa com aumento de 10 vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2 Análise química

Os resultados da análise química estão disponibilizados na Tabela 4, na qual é possível ver a composição química das amostras por meio dos seus respectivos óxidos.

Tabela 4 – Resultado da análise química por fluorescência de raios X

Amostras	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%TiO ₂	%P ₂ O ₅	%Na ₂ O	%K ₂ O	%MnO	%LOI
01	51.2	20.6	15.6	0.78	1.73	0.76	0.09	<0,1	0.73	0.06	9.9
02	58.4	14.6	19.5	0.06	0.23	0.73	0.14	<0,1	0.43	0.08	7.45
03	29.2	10.1	46.5	0.07	6.09	0.51	0.19	<0,1	4.03	0.08	4.84
04	63.1	13.6	13.2	0.1	1.09	0.65	0.04	0.24	1.94	0.01	5.32
05	53.8	13.4	23.6	0.17	0.38	0.77	0.16	<0,1	0.61	0.17	7.3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022) LOI - Loss On Ignition.

De forma geral, as amostras apresentam altos teores de SiO₂, variando de 29,2 a 63,1%. Santos (1989) destaca que a sílica pode ser oriunda de silicatos ou ocorrer de modo livre, oriunda de quartzo, opala, ágata. Ressalta-se que a presença de sílica influencia diretamente nas propriedades da argila, proporcionando menores valores de plasticidade e retração linear.

Além disso, pode-se observar que a amostra 03 é a que apresenta a menor proporção de SiO_2 (29,2%) e a maior proporção de Fe_2O_3 (46,5%), podendo indicar a presença de uma maior quantidade de minerais de ferro nesta amostra, o que vai de encontro a observação visual, onde foi possível notar a presença de minerais com brilho metálico.

Em relação a porcentagem de alumina (Al_2O_3), pode-se observar uma pequena variação entre as amostras, sendo 20,6%, para a amostra 1 e 10,1%, para a amostra 05. Santos (1989) ressalta que a baixa porcentagem de Al_2O_3 , juntamente com outros óxidos caracterizados como fundentes, sendo eles: Fe_2O_3 , FeO , MgO , Na_2O , K_2O e CaO , podem reduzir a refratariedade do material. A Tabela 5 apresenta a porcentagem de cada óxido considerado fundente, bem como a soma total de todos os fundentes em cada amostra. Os fundentes atuam na diminuição da temperatura de formação da fase líquida, durante o processo de queima da massa cerâmica, pode ser considerado bom ou ruim dependendo do objetivo.

Tabela 5 – Óxidos fundentes presentes nas amostras

Amostras	% Fe_2O_3	% MgO	% Na_2O	% K_2O	% CaO	Soma (%)
1	15,6	1,73	0,1	0,73	0,78	18,94
2	19,5	0,23	0,1	0,43	0,06	20,32
3	46,5	6,09	0,1	4,03	0,07	56,79
4	13,2	1,09	0,24	1,94	0,1	16,47
5	23,6	0,38	0,1	0,61	0,17	24,86

Os óxidos CaO e MgO são considerados os óxidos fundentes propriamente ditos já Na_2O e K_2O são óxidos vitrificantes, atuando na formação da fase vítrea da cerâmica. Pode-se perceber que os fundentes compõem em maioria a composição das amostras com uma ressalva para o SiO_2 e Al_2O_3 , que possuem alta porcentagem em todas as amostras, a porcentagem de óxidos fundentes nas amostras giram em torno de 20%, sendo a exceção a amostra 3 que é composta por 56,79% de óxidos fundentes.

Como a argila se encontra inserida em um depósito de minério de ferro, então espera-se que a porcentagem dos óxidos de ferro nas amostras seja significativa. A amostra 04 apresenta menor porcentagem de óxido de ferro (13,2%) e a amostra 3 a maior (46,5%). As amostras 5m 1 e 2 apresentam valores intermediários.

Além de atuar na redução da refratariedade, a alta da Fe_2O_3 , causa uma alteração na cor do material (SANTOS, 1989). Pode-se perceber na Figura 24 que as amostras com maior Fe_2O_3 , apresentam coloração mais próxima ao marrom. Apesar de isso não ser observado

em todas as amostras, como a amostra 1, que apresenta uma coloração mais clara mas não possui a menor porcentagem de ferro entre as amostras, um possível motivo para isso pode ser a combinação do ferro com os demais componentes da argila.

Figura 24 – Coloração das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A presença de componentes fundentes da argila como o K_2O e Na_2O podem estar associados a presença de feldspatos e micas, sendo também importantes para a vitrificação (SANTOS, 1989). Apenas as amostras 03 e 04 apresentam valores acima de 1% com, 4,13% e 2,18%, respectivamente.

Pela alta porcentagem de Fe_2O_3 , somadas com as outras porcentagens de componentes fundentes, pode-se inferir que o material estudado não apresentaria um bom desempenho como aplicação para material refratário. De acordo com Santos (1989), argilas refratárias possuem teor de Al_2O_3 entre 30% e 40%, valores que não são observados em nenhuma das amostras.

Santos (1975) estabelece requisitos para o uso de caulins para a produção de plástico

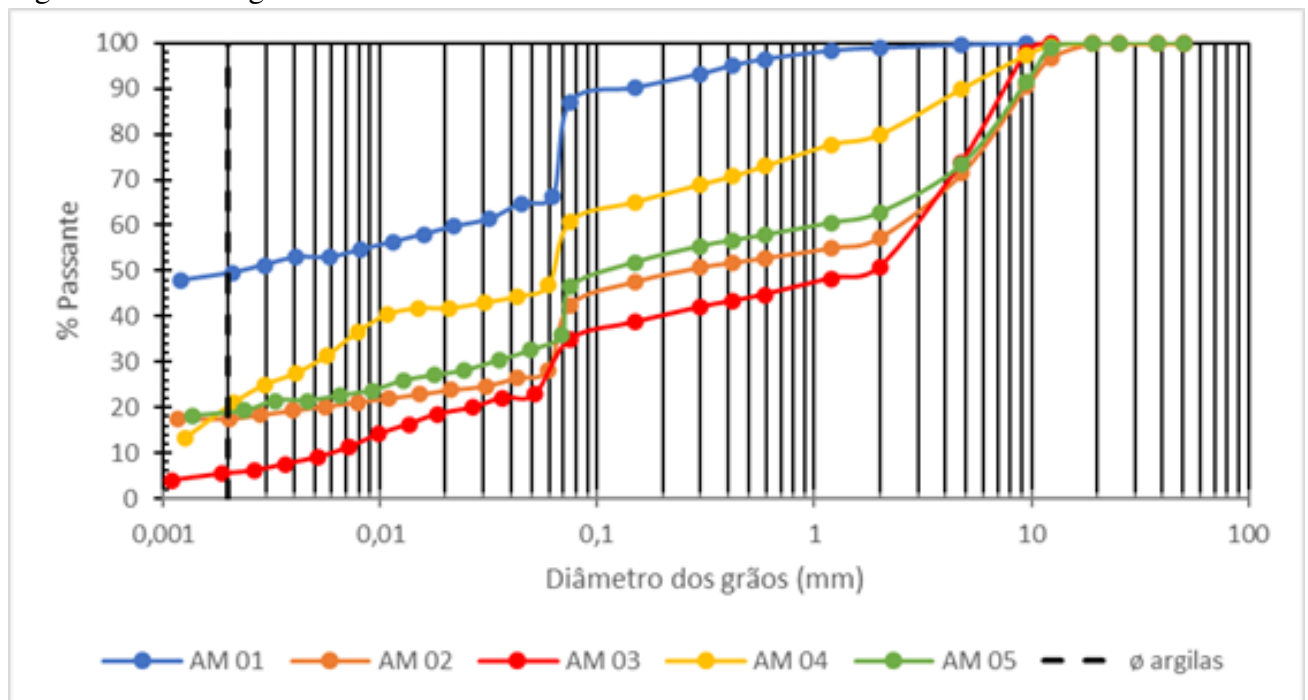
e borracha, sendo eles: %SiO₂ e Al₂O₃, entre 40-45% e 35-45% respectivamente, além ainda com uma %LOI (perda ao fogo) inferior a 15%. Comparando com os resultados do presente trabalho, nota-se que nenhuma das amostras apresentam valores dentro as porcentagens estabelecidas.

5.3 Caracterização física

5.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi constituída de 3 ensaios, a sedimentação destinada ao material de menor granulometria e posteriormente ao peneiramento fino e o peneiramento a seco, sendo este último realizado para a fração grosseira do material. Na Figura 25 é possível observar a curva granulométrica das amostras, sendo a presença da linha tracejada indica o diâmetro máximo das argilas.

Figura 25 – Curva granulométrica das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Através da Figura 25 é possível identificar que as amostras 2 e 5 possuem comportamento granulométrico semelhante, as amostras 1 e 3 apresentam comportamento mais distintos, enquanto que a amostra 4 se encontra entre as demais. A Tabela 6 mostra a composição de cada amostra em porcentagem, tendo como base os limites para classificação estabelecidos pela NBR 6502 (1995).

Tabela 6 – Composição granulométrica das amostras

Composição (%)	Am 1	Am 2	Am 3	Am 4	Am 5
Pedregulho	1,1	42,6	49,1	20,0	37,2
Areia grossa	2,4	4,4	6,0	6,9	4,9
Areia média	6,2	5,2	6,1	7,8	6,0
Areia fina	23,7	19,4	15,8	18,3	16,0
Silte	16,8	10,7	17,4	25,6	16,5
Argila	49,5	17,4	5,3	21,0	19,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As divisões de tamanho dos grãos foram feitas de acordo com a NBR 6502 (1995), considerando os seguintes limites: até 0,002 mm para argila, de 0,002 mm a 0,06 mm para silte, 0,06 mm a 0,2 mm para areia fina, 0,2 mm a 0,6 mm para areia média, 0,6 mm a 2 mm areia grossa e acima de 2 mm para pedregulho. Percebe-se uma alta porcentagem de pedregulho na maioria das amostras, com exceção da amostra 1, as demais apresentam valores acima de 20%. Uma possível explicação para este fato pode estar relacionado aos locais da amostragem.

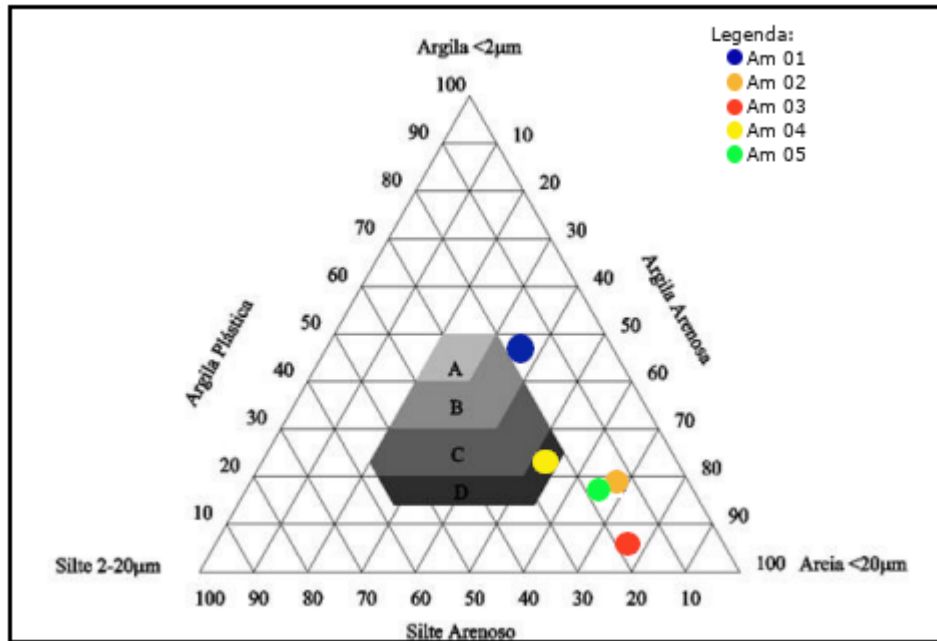
A porcentagem de argila nas amostras variam de 5,38 a 49,56%, amostra 3 e amostra 1, respectivamente. As demais amostras possuem valores em torno de 20%. O menor percentual de argila encontrado na amostra 3, pode estar associado a uma grande quantidade de minerais de ferro presentes na amostra. Isso pode ser justificado pela maior porcentagem de Fe_2O_3 determinado na análise química. A amostra 1 possui maior porcentagem de argila e também possui a menor porcentagem de óxido de ferro determinada na análise química.

A partir das composições granulométricas e considerando o diagrama de Winkler (Figura 26), foi possível realizar suposições sobre possíveis áreas e aplicação na indústria da cerâmica vermelha.

De acordo com Vieira e Emiliano (2013), pode-se considerar quatro regiões para aplicação na indústria da cerâmica vermelha, de modo que a região “A” é destinada a materiais de maior dificuldade de conformação, a região “B” destinada a fabricação de telhas, e a região “C”, apropriada a tijolos furados, já a região “D” é destinada a produção de tijolos maciços.

Apenas a amostra 4 ficou dentro das regiões estipuladas (Região D), sendo considerada apta a produção de tijolos maciços. Nota-se também que a amostra 1 está bem próxima da região B, enquanto a amostra 3 está bem afastada de qualquer região de interesse do diagrama.

Figura 26 – Diagrama de winkler.



Fonte: Adaptado de Mendonça *et al.* (2017)

5.3.2 Índices de consistência

A Tabela 7 apresenta os valores de LP, para as cinco amostras e suas duplicatas. A tabela também apresenta o intervalo no qual as amostras são considerados aceitáveis (variação de 5% a partir da média), e caso algum dos valores fique fora do intervalo a amostra é considerada errática. Dentre estas, apenas as amostras 3 e 5 encontram-se fora do intervalo, embora seja importante ressaltar que suas duplicatas se encontram dentro de seus respectivos intervalos e portanto são informações válidas para as análises que serão feitas. O limite de plasticidade apresenta valores que variam de 16% a 28% (amostras 5 e 1, respectivamente).

Tabela 7 – Resultado dos ensaios de LP.

Amostras	LP	$\bar{\chi}$	$0,95 \cdot \bar{\chi}$	$1,05 \cdot \bar{\chi}$	Situação		
1	28,95	27,5	27,85	28,100	26,695	29,505	DI
1'	28,66	27,18	29,33	28,390	26,971	29,810	DI
2	21,28	22,99	21,95	22,073	20,970	23,177	DI
2'	22,08	22,29	21,95	22,107	21,001	23,212	DI
3	19,3	20,45	17,65	19,133	18,177	20,090	FI
3'	17,53	18,49	18,64	18,220	17,309	19,131	DI
4	16,83	17,39	17,39	17,203	16,343	18,064	DI
4'	21,68	20,95	20	20,877	19,833	21,921	DI
5	10,09	11,84	9,91	10,613	10,083	11,144	FI
5'	17,04	15,97	17,29	16,767	15,928	17,605	DI

Fonte: Elaborado pelo autor (2022). ' - duplicata; DI - dentro do intervalo; FI - fora do intervalo

A Tabela 8 apresenta os limites de Atteberg para as cinco amostras. Os valores de liquidez (gráficos no Apêndice A), se encontram no intervalo de 28% a 58% sendo apresentados pelas amostras 3 e 1, respectivamente, como algumas amostras não obtiveram resultado dentro do intervalo aceitável de LP, o seu cálculo de IP não se faz coerente. O índice de plasticidade obtido pela diferença entre LL e LP varia de 12% a 31% (amostras 3 e 1 respectivamente).

Tabela 8 – Resultado dos índices de consistência.

Amostras	LL (W %)	LP (W %)	IP	Média LL	Média LP	Média IP	σ_{LL}	σ_{LP}	σ_{IP}
1	58	28	30	58,5	28	30,5	0,71	0	0,71
1'	59	28	31						
2	34	22	12	34,5	22	12,5	0,71	0	0,71
2'	35	22	13						
3	28	NA	NA	28,5	18	11	0,71	NA	NA
3'	29	18	11						
4	40	17	23	39,5	19	20,5	0,71	2,83	3,54
4'	39	21	18						
5	33	NA	NA	32	17	14	1,41	NA	NA
5'	31	17	14						

Fonte: Elaborado pelo autor (2022). ' - duplicata; NA - Não se Aplica

Segundo Caputo (1988), é possível realizar uma classificação das argilas levando como critério a plasticidade, sendo as argilas classificadas em: altamente plásticas, medianamente plásticas e fracamente plásticas, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação das argilas por meio do IP.

Índice de Plasticidade	Classificação
1 - 7	Fracamente plástico
7 - 15	Medianamente plásticos
>15	Altamente Plásticos

Fonte: Adaptado de Caputo (1988)

Levando em consideração os valores médios obtidos do índice de plasticidade (IP), as amostras 2, 3 e 5 são classificadas como medianamente plásticas, enquanto que as amostras 1, 4 são classificadas como altamente plásticas.

As amostras 2, 3 e 5 apresentam os menores valores do índice de plasticidade, uma possível razão para isso se dá ao fato de que as mesmas apresentam em sua granulometria, maior porcentagem da fração pedregulho. Dentre estas, a amostra 3 é a que apresenta a menor porcentagem da fração argila.

A Tabela 10 fornece valores de IP e LP comumente aceitáveis para a produção de tijolos e telhas, de acordo com Dondi (2006). Enquanto a Tabela 11 apresenta quais amostras se

encontram nos parâmetros de Dondi (2006). A amostra 04 se encontra na variação ótima, em ambos os critérios, porém na variação aceitável estão as amostras 1, 2 e 3. As demais amostras se enquadram em apenas na variação aceitável de IP, já parâmetro LP a amostra 5 não atingiu o valor mínimo.

Tabela 10 – Valores de referência aceitos na prática industrial

Tipos de produtos	parâmetros	unidade	Variação ótima	Variação aceitável
Telhas e tijolos	IP de atterberg	%peso	15 - 25	10 - 35
	LP de atterberg	%peso	18 - 25	18 - 30

Fonte: Adaptado de Dondi (2006)

Tabela 11 – Classificação das amostras de acordo com os parâmetros de Dondi (2006).

Amostras	IP	LP	Parâmetro IP	Parâmetro LP
1	30,5	28	●	●
2	12,5	22	●	●
3	11	18	●	●
4	20,5	19	●	●
5	14	17	●	●

Fonte: Elaborado pelo autor (2021) ● - variação ótima; ● - variação aceitável; ● - Não atende aos parâmetros.

Macedo *et al.* (2008) obteve intervalos ideais para os três parâmetros obtidos no índice de consistência (LL, LP e IP), visando sua utilização em cerâmicas vermelhas. Os resultados dos ensaios juntamente com os parâmetros de Macedo *et al.* (2008), estão disponibilizados na Tabela 12 evidenciando quais amostras atendem ou não a classificação.

Tabela 12 – Valores obtidos no Índice de consistência vs valores encontrados por Macedo *et al.* (2008)

Amostras	Valores de Macedo <i>et al.</i> (2008)					
	LL	LP	IP	LL(30 - 60)	LP(15-30)	IP(10-30)
1	59	28	30	●	●	●
2	35	22	13	●	●	●
3	29	18	11	●	●	●
4	40	19	21	●	●	●
5	31	17	14	●	●	●

Fonte: Elaborado pelo autor (2022) ● - Atende aos parâmetros; ● - Não atende aos parâmetros.

Percebe-se que somente a amostra 3 não se encontra nos valores estabelecidos por Macedo *et al.* (2008), sendo nesta amostra somente o limite de liquidez que se encontra fora do intervalo.

Ao compararmos os valores de Dondi (2006) e Macedo *et al.* (2008), pode-se notar que o primeiro possui um intervalo menor, já o segundo além de um intervalo maior possui um critério de avaliação a mais. Se adicionarmos a comparação os valores encontrados pelo diagrama de Winkler tem-se que a amostra 4 é unânime, sendo indicada para a produção de cerâmica vermelha em todos os métodos de avaliação utilizados. Para os parâmetros de Dondi (2006), as amostras 1 e 2 se encontram aptas para sua utilização como matéria prima de cerâmica vermelha nas duas avaliações, embora Dondi (2006), apresente intervalos ótimos e aceitáveis em que as amostras se encontram. A amostra 3 não apresenta dentro de nenhuma faixa indicada de valores em nenhum dos métodos, com valores abaixo do mínimo, o que corrobora com a granulometria que indica baixa porcentagem da fração argila nesta amostra. A amostra 5 não atingiu a especificações mínimas para Dondi (2006), mas se encontra dentro da variação para Macedo *et al.* (2008).

O diagrama de Winkler apresenta resultados mais convergentes com a análise feita com a variação apresentada por Dondi (2006), vale ressaltar que o diagrama de Winkler utiliza critérios de classificação diferente dos demais embora haja uma relação entre granulometria e o índice de consistência.

Um dos possíveis fatores que pode fazer com que a amostra 3 não atinja os valores mínimos é a presença de sílica na composição da amostra. A sílica presente na composição das amostras, pode ser oriunda de silicatos ou ocorrendo de modo livre. Segundo Santos (1989), a presença da sílica livre influencia diretamente nas propriedades físicas da argila, proporcionando uma baixa na plasticidade e uma retração linear da mesma.

Ao compararmos os dados de plasticidade obtidos, tem-se que a amostra 4 apresenta maior porcentagem de SiO₂, entre as amostras, se compararmos com os resultados de plasticidade, desta mesma amostra nota-se que sua plasticidade se encontra entre valores intermediários o que pode indicar que a origem da sílica na composição da argila é proveniente de silicatos. Os maiores valores do limite de plasticidade são atribuídos a amostra 1 e 2, respectivamente ambas possuem uma porcentagem de sílica considerável se comparada com a amostra 3, e esta mesmo com pouca sílica apresenta valor intermediário de LP assim como a amostra 4. A amostra 5 possui o menor valor de LP, porém a sua composição química aponta a porcentagem de SiO₂ é

de 53,8%.

5.3.3 Densidade

A densidade das argilas obtidas através da técnica de picnometria à água é apresentada na Tabela 13. Pode-se observar valores encontrados variam de 2,32 g/cm³ a 3,34 g/cm³. O maior valor encontrado foi para a amostra 3, sendo seu valor acima dos demais podendo estar relacionado a porcentagem de ferro em sua composição.

Tabela 13 – Resultado picnometria

Amostras	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	δ_m
1	2,426	2,42	0,006	2,42
2	2,76	2,753	0,006	2,76
3	3,338	3,332	0,006	3,34
4	2,654	2,655	0,001	2,65
5	2,312	2,318	0,006	2,32

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4 Possíveis Aplicações

Analisando os resultados obtidos, bem como o levantamento bibliográfico foi possível propor possíveis aplicações nas áreas de fabricação de agregado leve, produção de painéis de barro, aplicações em fluidos de perfuração e produção de nanocompósitos. Vale ressaltar que embora apresentem resultados promissores, é necessário mais estudos para se comprovar ou não as aplicações sugeridas.

Os agregados são utilizados na composição do concreto, sendo usualmente minerais ou rochas com granulometria adequadas. Com o objetivo de deixar a composição do concreto mais leve, alguns pesquisadores passaram a utilizar materiais menos densos, podendo ser feitos de materiais sintéticos ou mineral (DIPROTEC, 20–), sendo um dos materiais estudados as argilas.

Santis (2012) realizou um estudo com materiais de 5 empresas de cidades diferentes do estado de São Paulo, buscando atestar a viabilidade de massa cerâmica para confecção de agregados leves para uso em concretos estruturais. As amostras passaram por ensaios químicos e físicos, sendo eles: índices de consistência, umidade, análise granulométrica, massa específica,

DRX, FRX e análise térmica. Posterior a esses ensaios, foram confeccionados corpos de prova e levados para a queima, tais corpos de prova foram submetidos a ensaios de retração linear, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, resistência a compressão. Os corpos de prova destinados a confecção do agregado leve foram caracterizados por ensaios de massa específica, slump, teor de ar incorporado, resistência à compressão e a tração, módulo de deformação, retração por secagem, absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente. O resultado final encontrado por Santis (2012), mostrou que os valores de massa específica e a resistência a compressão encontram-se intermediários entre os valores materiais já utilizados como agregado leve, fazendo o uso de argila calcinada uma opção viável para a confecção de agregados leves. Ao ser feita a comparação da análise granulométrica do trabalho de Santis (2012), mostrada na Tabela 14, com o presente trabalho, percebe-se que somente a amostra 1 apresenta composição granulométrica (Tabela 6) semelhante, por isso, somente a amostra 1 será comparada com os resultados de Santis (2012).

Tabela 14 – Distribuição granulométrica realizado por Santis (2012).

Amostras	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Pedregulho (%)
Tambau	61	34	2	1	1	1
Porto Ferreira	48	28	17	6	1	0
Ubarama	53	19	24	3	1	0
Leme	48,5	37,5	10	3	1	0
Itu	50	31	6	9	9	0

Fonte: Adaptado de Santis (2012)

A amostra 1 apresenta valores bem próximos da amostra Leme e Ubarama, porém, nota-se que tal amostra possui um percentual maior da fração areia fina, e menor de silte em sua composição. Já para os índices de consistência e a densidade, a Tabela 15, apresenta os valores dos valores obtidos por Santis (2012), juntamente com os valores obtidos da amostra 1 destacado em vermelho.

Tabela 15 – Valores de índice de consistência e densidade comparados com a amostra 1

Amostras	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\delta_s(g/cm^3)$
Tambau	67	28,1	38,9	2,36
Porto Ferreira	48,8	30,7	18,1	2,64
Ubarama	57,5	19,1	38,4	2,695
Leme	58	25,9	32,1	2,675
Itu	49	21,7	27,3	2,585
Amostra 1	59	28	31	2,42

Fonte: Adaptado de Santis (2012)

Analisando os valores do índice de consistência, nota-se que, a amostra 1 apresenta valores próximos ao da amostra Leme, enquanto sua densidade é uma das mais baixas, o que pode vir a ser uma vantagem, uma vez que o objetivo de um agregado leve ser menos denso.

As maiores divergências entre a amostra 1 e as amostras analisadas por Santis (2012), está na composição química. A Tabela 16 apresenta a composição química das amostras em porcentagem, juntamente com a amostra 1 do presente trabalho, com esta última destacada em vermelho.

Tabela 16 – Resultados da análise química encontrados por Santis (2012)

Amostras	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	CaO (%)	PF (%)
Tambau	66,67	0,904	15,64	6,32	0,057	1,36	0,12	2,4	0,119	0,32	6,04
Porto Ferreira	59,5	0,875	17,38	7,43	0,074	2,94	1,23	3,86	0,183	0,58	5,42
Ubarama	60,32	1,35	21,1	3,85	0,034	0,28	0,13	1,65	0,12	0,12	10,96
Leme	68,18	0,614	14,42	4,88	0,088	1,81	0,31	4,2	0,11	0,32	4,64
Itu	65,18	1,282	16,84	6,81	0,066	0,44	0,07	0,94	0,088	0,23	7,68
Amostra 1	51,2	0,76	20,6	15,6	0,06	1,73	0,1	0,73	0,09	0,78	9,9

Fonte: adaptado Santis (2012)

A amostra 1 difere das demais na presença de SiO₂, na qual apresenta apenas 51,2% enquanto as demais apresentam valores acima de 59%. Outro óxido que difere bastante é o Fe₂O₃, no qual a amostra 1 apresenta maior percentual, entre as amostras. Se compararmos a amostra 1 com a amostra Leme, as maiores divergências são nos óxidos SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ e K₂O.

Santis (2012) concluiu que agregados leves utilizados em concreto feitos com argila calcinada pode ser uma alternativa viável, uma vez que mostraram valores intermediários entre os agregados comumente usados (brita e argila expandida). Portanto, é possível que a amostra 1 seja viável para tal fim, sendo para isso necessário estudos mais específicos para essa aplicação.

Batista (2010) realizou a caracterização de argilas bentoníticas de Cubati, visando sua aplicação em fluidos de perfuração a base de água. Este tipo de argila apresenta propriedades viscosificantes e tixotrópicas. A caracterização das oito argilas se deu por meio dos seguintes ensaios: fluorescência de raios X, picnometria de gás, granulometria, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, análise térmica diferencial e gravimétrica. Para efeito de comparação com o presente estudo serão utilizadas somente a fluorescência de raios X, picnometria e granulometria.

Ao compararmos os valores de densidade obtidos por Batista (2010), disponibilizados na Tabela 17, com o do presente trabalho (Tabela 13), percebe-se que todas amostras se encontram em uma faixa aceitável, com a exceção da amostra 3 que possui valor bem acima das demais.

Em relação a granulometria, em especial a fração argila, a amostra 1 e 4 (Tabela 6, apresentam os resultados mais próximos ao obtidos por Batista (2010), em seu estudo nas amostras 1 e 6, respectivamente.

Tabela 17 – Densidade obtida por Batista (2010)

Amostras	1	2	3	4	5	6	8
Densidade (g/cm ³)	2,57	2,61	2,52	2,59	2,64	2,47	2,68
Fração argila (%)	41,36	38,49	32,23	34,53	37,56	20,41	31,60

Fonte: Adaptado de Batista (2010)

Além da granulometria das amostras 1 e 4 deste trabalho possuem valores próximos aos da amostras 1 e 6, a análise química se mostra bem similar, como se pode ver na Tabela 18, enquanto que os resultados da análise química do presente trabalho se encontram na Tabela 4.

Tabela 18 – Análise química obtida por Batista (2010)

Amostras	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO(%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O(%)	CaO(%)	BaO(%)	MnO(%)	Cr ₂ O ₃ (%)
1	52,78	27,39	6,35	0	0,79	0,56	0,46	0,25	0,05	0,04
2	52,64	28,38	4,26	0	0,95	0,76	0,49	0,36	0,02	0,04
3	52,27	26,40	5,09	1,96	0,91	0,7	0,62	0,25	0,03	0,03
4	54,31	25,23	4,17	2,82	0,79	0,58	0,53	0,29	0,01	0,04
5	53,15	26,39	7,42	0	0,81	0,87	0,44	0,23	0,03	0,03
6	65,82	17,84	6,28	2,05	0,52	0,81	0,92	0,23	0,02	0
8	51,61	23,27	11,12	0	0,76	1,55	0,65	0,38	0,05	0,03

Fonte: Adaptado de Batista (2010)

As maiores discrepâncias se encontram na porcentagem de Fe₂O₃, e MgO. Com base na comparação dos resultados, as amostras 1 e 4 se mostram promissoras para uso em fluidos de perfuração, porém tal potencial poderá ser melhor detalhado com estudos direcionados a este fim.

Uma aplicação da argila, é sua utilização em fluidos de perfuração de poços de petróleo, tais argilas são utilizadas por apresentarem características reológicas que interessam a indústria petrolífera.

Pereira (2014), realizou um estudo de caracterização de argilas bentoníticas do estado da Paraíba visando sua aplicação em fluidos de perfuração de petróleo a argila foi caracterizada por granulometria a laser, DRX, análise química, CTC, TG e DTA. Após a caracterização da argila em estado puro, as mesmas foram transformadas em sódicas e posteriormente realizados ensaios de viscosidade aparente e plástica. Pereira (2014) obteve como resultado que as argilas ativadas com Na₂CO₃, se encontram parcialmente dentro das especificações para fluido de perfuração, enquanto que as amostras ativadas com (NaPO₃)₆ não apresentaram melhoras

reológicas.

Ao comparar as análises de Pereira (2014) com as do trabalho, percebe-se que a amostra 6 apresenta uma composição química semelhante e uma porcentagem da fração argila mais próxima da amostra 1 deste estudo, embora Pereira (2014), ressalte a importância do MgO ser um dos fatores que produziu uma melhora nas argilas ativadas e a amostra 1 deste estudo possui um valor menor do que todas as amostras de Pereira (2014), um aprofundamento dos estudos das propriedades reológicas da amostra 1, poderia vir a ser esclarecedor quanto a sua utilização como componente em fluidos de perfuração de poços de petróleo.

Uma outra aplicação bastante tangível é a produção e painéis de barro, Borlini e Caranassios (2007) realizaram a caracterização química, mineralógica e física da argila do vale do Mulembá com o objetivo de conhecer suas propriedades, sendo a argila utilizada na fabricação de painéis de barro. A análise química mostrou que a argila possui uma alto teor de óxido de alumínio, bem como uma alta porcentagem de óxidos fundentes, como mostra a Tabela 19.

Tabela 19 – Análise química obtida por Borlini e Caranassios (2007)

Amostras	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO(%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O(%)	CaO(%)	P ₂ O ₅ (%)
Argila	54,6	22,8	6,4	0,77	2,6	3,7	1	0,48

Fonte: Adaptado de Borlini e Caranassios (2007)

Ao se comparar os dados com os do presente trabalho, observa-se que a amostra 1 possui valores semelhantes aos óxidos de silício, cálcio, alumínio, enquanto que as maiores divergências se encontram em óxidos de potássio, sódio e ferro.

As análises físicas mostraram que o índice de consistência, apresentam valores de 50,2%, 21,2% e 29,1%, respectivamente tais valores são próximos aos da amostra 1 do presente estudo, mostrando uma possível aplicação para amostra 1 deste estudo. Com relação as divergências de óxidos fundentes, Borlini e Caranassios (2007) ressaltam que óxidos ditos fundentes só assumem esse papel a uma temperatura de 700°C, porém as painéis de barro são produzidas a 600°C, por tanto tais óxidos não agem como peça chave na produção deste material.

Outra possível aplicação para as argilas é a produção de nanocompósitos Rodrigues *et al.* (2007) realizaram um estudo de desenvolvimento de nanocompósitos constituídos de polipropileno e argila bentonita, caracterizando o material por meio de granulometria a laser, análise química, DRX, espectroscopia infravermelho, microscopia eletrônica de varredura. Os ensaios foram feitos na argila in natura e purificada, já o nanocompósito foi produzido a partir de uma extrusora.

Os resultados da granulometria realizada por Rodrigues *et al.* (2007) mostraram uma fração de argila com 44%, ao compararmos com as amostras deste estudo, percebe-se que a amostra 1 possui porcentagem similar, e quanto a análise química da argila (Tabela 20), a amostra 1 apresenta valores similares de óxidos de sílica e alumínio e magnésio, após a purificação percebe-se que os óxidos de ferro, magnésio e potássio caíram, porém na amostra 1 deste estudo estes óxidos já se encontram em concentrações menores da que as existentes no estudo da Rodrigues *et al.* (2007).

Tabela 20 – Análise química obtida por Rodrigues *et al.* (2007)

Amostras	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO(%)	K ₂ O(%)	CaO(%)	Na ₂ O(%)
Argila	54,74	21,35	8	2,02	0,12	-	0,5

Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2007)

Rodrigues *et al.* (2007), em seu estudo, obtiveram melhoras nas propriedades mecânicas como alongamento final e tenacidade. A granulometria e a análise química tem valores similares o que justificaria um estudo mais detalhado relacionado a utilização da amostra 1 para formação de nanocompósitos.

6 CONCLUSÃO

Analisando os resultados dos ensaios, chegou-se as seguintes conclusões:

- A caracterização química evidenciou que a %SiO₂ varia de 29,2% a 63,1%. A %Al₂O₃ varia de 10,1% a 20,6%. A %Fe₂O₃ varia de 5,3% a 49,5%.
- A fração argila apresenta uma porcentagem que varia de 5,3% a 49,5%, sendo maior na amostra 1 e menor na amostra 3. O ensaio de índice de consistência apresenta um IP que varia de 11% a 30,5%. O limite de liquidez varia de 58,5% a 28,5% para as amostras 1 e 3, respectivamente, o limite de plasticidade apresenta variação de 17% a 28% amostras 5 e 1, respectivamente. O ensaio de densidade os valores obtidos variam de 2,32 g/cm³ a 2,76g/cm³.
- Seguindo os critérios de Caputo (1988) as amostras 2, 3 e 5, são classificadas como medianamente plásticas, já as amostras 1 e 4 são classificadas como altamente plásticas.
- De acordo com os valores de IP e LP apresentados por Dondi (2006) as amostras 1, 2, 3 e 4 são aptas como matéria-prima para a indústria de cerâmica vermelha;
- De acordo com os valores de LL, IP e LP apresentados por Macedo *et al.* (2008) as amostras 1, 2, 4 e 5 são aptas como matéria-prima para a indústria de cerâmica vermelha;
- De acordo com o diagrama de Winkler somente a amostra 04, atende as especificações para a produção de tijolos maciços.
- As amostras não se encontram dentro da variação dos óxidos SiO₂ e Al₂O₃ desejável para o uso em produção de plástico e borracha.
- Pela alta porcentagem dos óxidos considerados fundentes, pode-se inferir que nenhuma das amostras seria uma boa matéria prima para a confecção de materiais refratários.
- É necessário mais estudos para comprovar o uso das amostras nas possíveis aplicações sugeridas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6457/2016 Amostras de Solo**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6459/2017 Solo**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6502/1995 Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7180/2016 Solo**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7181 Solo**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- BATISTA, A. P. d. S. Caracterização de argilas bentonitas de cubati-pb visando sua aplicação em fluidos de perfuração base água. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- BERGAYA, F.; LAGALY, G. Chapter 1 - general introduction: Clays, clay minerals, and clay science. In: BERGAYA, F.; LAGALY, G. (Ed.). **Handbook of Clay Science**. Elsevier, 2013, (Developments in Clay Science, v. 5). p. 1–19. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982588000018>>.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; BAARS, F. J.; DELGADO, I. d. M.; ABRAM, M. B.; NETO, R. L.; MATOS, G. M. M. d.; SANTOS, J. O. S. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**: texto, mapas e sig. CPRM, 2003.
- BORLINI, M. C.; CARANASSIOS, A. **Caracterização química, mineralógica e física da argila do Vale do Mulembá–ES utilizada na fabricação de painéis de barro**. CETEM, Rio de Janeiro, 2007.
- CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. d. S.; TANNO, L. C. Rmis: argila para cerâmica vermelha. In: **Rochas e minerais industriais**: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. cap. 33, p. 747–770.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e científicos, 1988. v. 1.
- CARRETERO, M. I.; POZO, M. Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical industry: Part i. excipients and medical applications. **Applied Clay Science**, Elsevier, v. 46, n. 1, p. 73–80, 2009.
- CEARÁ. **Ceará em Mapas**: Tipos climáticos. 2007. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/126x.htm>>. (Acesso em 12/07/2021).
- CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos **Atlas dos recursos hídricos do Ceará**. 2019. <<http://atlas.cogerh.com.br/>>. (Acessado em: 07/04/2021).
- CORREIA, J. C. G.; COUTO, H. J. B. Classificação e peneiramento. In: **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 5, p. 225–269.

COSTA, M. J.; FRANÇA, J. B. d.; LINS, C. A. C.; BACCHIEGGA, I. F.; HABEKOST, C. R.; CRUZ, W. B. d. **Projeto Jaibaras**: Relatório final. CPRM, v. 1, 1973.

DANTAS, A.; GALINDO, A.; MEDEIROS, V.; CAVALCANTE, R.; SOUZA, R. Nova cruz stock (são josé do campestre domain, portion ne of the borborema province): Geology and petrography. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 71, p. 26–42, 12 2019.

DAS, B. M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. ISBN 9788522105489.

DEER W. A., F.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An Introduction to the Rock-Forming Minerals**. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2013. ISBN 9780903056274. Disponível em: <<https://doi.org/10.1180/DHZ>>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM **DNER 93/1994 Solo**: Determinação da densidade real. Fortaleza, 1994.

DIPROTEC. **Agregados Leves**. 20–. Disponível em: <<https://www.diprotec.com.br/produto/agregados-leves/#:~:text=Agregados%20leves%20s%C3%A3o%20agregados%20minerais,o%20peso%20pr%C3%B3prio%20do%20concreto.>> (Acessado em: 30/04/2022).

DOMINGUEZ, E.; MAS, G.; CRAVERO, F.; RESEARCH, I. A. for C.; SOCIETY, C. M. **2001. A Clay Odyssey**. [S.l.: s.n.]. (2001, a Clay Odyssey: Proceedings of the 12 International Clay Conference, Bahía Blanca, Argentina, July 22-28, 2001). ISBN 9780444509451.

DONDI, M. Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, p. 36–40, 2006.

FERREIRA, O. P.; ALVES, O. L.; MACEDO, J. d. S.; GIMENEZ, I. d. F.; BARRETO, L. S. Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 30, p. 464–467, 2007.

GUGGENHEIM, S.; MARTIN, R. Definition of clay and clay mineral: joint report of the aipea nomenclature and cms nomenclature committees. **Clays and clay minerals**, Citeaser, v. 43, n. 2, p. 255–256, 1995.

HACKSPACHER, P.; SOARES, J.; PETTA, R. Geologia do grupo ubajara, região de frecheirinha (ce). **Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 35, p. 2661–2677, 1988.

IBGE. **Biblioteca**. 20–. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=3537&view=detalhes>>. (Acessado em: 10/08/2021).

IBGE. **Panorama de Sobral**. 2001. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/sobral/panorama>>. (Acessado em 10/07/2021).

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. ISSN 0103-9598. ISBN 978-85-240-3722-9.

JACOMINE P. K. T.; ALMEIDA, J. C. M. L. A. R. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará**. Recife, PE: Embrapa, 1973. v. 1.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2012. ISBN 9780471721574.

- LIMA, R. M. F.; LUZ, J. A. M. d. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Rem: Revista Escola de Minas**, SciELO Brasil, v. 54, p. 155–159, 2001.
- LÓPEZ-GALINDO, A.; VISERAS, C.; CEREZO, P. Compositional, technical and safety specifications of clays to be used as pharmaceutical and cosmetic products. **Applied Clay Science**, Elsevier, v. 36, n. 1-3, p. 51–63, 2007.
- LUZ, A. B. d.; CAMPOS, A. R. d.; CARVALHO, E. A. d.; BERTOLINO, L. C.; SCORZELLI, R. B. Argila-caulim. In: . [S.l.]: CETEM, 2008.
- LUZ, A. da; LINS, F. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. CETEM-MCT, 2008. ISBN 9788561121372. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FSAfSQAACAAJ>>.
- 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.
- MENDONÇA, G. C.; FERREIRA, C. C.; QUINTANA, L. H.; FONSECA, J. M. Uso do diagrama de Winkler para determinação da granulometria de uma argila in natura mais adições de cinza de carvão mineral. 2017.
- MORAES, J. M. Caracterização tecnológica e mineralógica de caulins brasileiros. In: **XIV Jornada de iniciação científica**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2006.
- MUKHERJEE, S. **The Science of Clays: Applications in Industry, Engineering, and Environment**. New Delhi: Springer, 2013. ISBN 9789400766822.
- MURRAY, H. **Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing, and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-sepiolite, and Common Clays**. [S.l.]: Elsevier, 2007. (Developments in clay science). ISBN 9780444517012.
- MURRAY, H. H.; KOGEL, J. E. Engineered clay products for the paper industry. **Applied Clay Science**, Elsevier, v. 29, n. 3-4, p. 199–206, 2005.
- NEVES, B. B. d. B. **O mapa geológico do Nordeste oriental do Brasil, escala 1/1.000. 000**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1983.
- OLIVEIRA, D. C. D.; MOHRIAK, W. U. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Paraíba interior sag basin, northern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 20, n. 3, p. 351–383, 2003. ISSN 0264-8172. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817203000448>>.
- PARENTE, C.; BOTELHO, N.; SANTOS, R.; GARCIA, M. d. G.; OLIVEIRA, C.; VERÍSSIMO, C. Contexto geológico, tipológico e geoquímico isotópico das brechas hidrotermalizadas de ferro e cobre do tipo IOCG associadas à bacia eo-paleozóica Jaibaras, da província Borborema, Brasil. **Contribuições à Metalogenia do Brasil**, v. 1, p. 175–198, 08 2011.
- PEREIRA, I. D. S. **Estudos de novas jazidas de argilas bentoníticas do estado da Paraíba, visando seu uso em fluidos de perfuração de poços de petróleo**. Monografia (Pós-Graduação em ciência e engenharia de materiais) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

PICCOLI, R.; NASCIMENTO, G. C.; VITORETTI, P. P.; WERNCK, A. S.; PERDONA, C. R.; PERUCCHI, P. **The importance of using diffraction of X ray in clays characterization; A importancia da utilizacao da difracao de raios X na caracterizacao de argilas.** 2009.

PINÉO, T. R. G.; FRANÇA, A. F. L.; BESSA, M. D. M. R.; MARTINS, M. D. Áreas de relevante interesse mineral-arim: Avaliação do potencial mineral do noroeste do ceará. In: **Províncias minerais do Brasil.** Fortaleza: CPRM, 2019.

PINTO, C. de S. **Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. ISBN 9788579751165.

PLATÃO. **Theaetetus.** 369 a.c. Disponível em: <<http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus%3Atext%3A1999.01.0172%3Atext%3DTheaet.%3Asection%3D147c>>. Acesso em: 1 jul. 2021.

POZZER, K. M. P. Escritas e escribas: o cuneiforme no antigo oriente próximo. **Classica: Revista Brasileira de Estudos Clássicos**, Sociedade Brasileira de Estudos Clássico (SBEC), v. 11, n. 11, p. 61–80, 1999.

ROCHA, F. N.; SUAREZ, P. A.; GUIMARÃES, E. M. Argilas e suas aplicações em utensílios e materiais cerâmicos. **Revista virtual de química**, v. 6, n. 4, p. 1105–1120, 2014.

RODRIGUES, A. W.; BRASILEIRO, M. I.; ARAÚJO, W. D.; ARAÚJO, E. M.; NEVES, G. A.; MELO, T. J. de. Desenvolvimento de nanocompósitos polipropileno/argila bentonita brasileira: I tratamento da argila e influência de compatibilizantes polares nas propriedades mecânicas. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 17, n. 3, p. 219–227, 2007.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. d. Análise granulométrica por peneiramento. In: **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. cap. 3, p. 55–72. ISBN 9788561121020.

SANTANA, E. W. de. Caderno regional da bacia do acarau. In: **Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará.** Fortaleza: INESP, 2009, (Coleção Cadernos Regionais do Pacto das Águas, v. 1).

SANTIS, B. C. de. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo.** Tese (Doutorado) — [Dissertação]. São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo, 2012.

SANTOS, H.; JACOMINE, P.; ANJOS, L.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, J.; COELHO, M.; ALMEIDA, J.; FILHO, J.; OLIVEIRA, J.; CUNHA, T. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília, DF: Embrapa, 2018. v. 5.

SANTOS, M. J. L.; TEXEIRA, C. d. L. Importância dos métodos analíticos de drx e frx para caracterização das argilas. **Revista FENEC, João Pessoa**, p. 339–345, 2017.

SANTOS, P. d. S. : Aplicações. São Paulo: E. Bluncher, 1975. (Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras).

SANTOS, P. de S. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2. ed. São Paulo: E. Bluncher, 1989. v. 1.

SCAPIN, M. A. **Aplicação da difração e fluorescência de raios-X (WDXRF): ensaios de argilominerais.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.

SILVA JUNIOR., O. G. d.; SANTOS, M. V. d.; MOURA, C. A. V.; NASCIMENTO, R. d. S.; VILAS, R. N. N. **Carta geológica Folha Frecheirinhas - SA.24-Y-C-VI**. 2014.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, J. **Fundamentos de Química Analítica**: tradução da edição americana. 8. ed. São Paulo, SP: Thomson, 2006. 787 p.

SOBRAL. **Prefeitura de Sobral - História**. 20—. Disponível em: <<https://www.sobral.ce.gov.br/a-cidade/historia>>. (Acessado em 10/04/2021).

SOLOS, S. **Análise Granulométrica do Solo - Ensaio Geotécnicos - A Curva e os Tipos de Análise. - Suporte Sondagens e Ensaio Geotécnicos**. 2011. Disponível em: <<https://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-a-curva-e-os-tipos-de-analise/72/>>. (Acessado em 18/04/2022).

SOUZA, R. A. d. **Estilo estrutural e contexto tectonoestratigráfico do Grupo Ubajara no NW do Ceará**. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2018.

STEVANOVIĆ, M. The age of clay: the social dynamics of house destruction. **Journal of anthropological archaeology**, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 334–395, 1997.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar**. 1. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2003. ISBN 9788521203179.

VERÍSSIMO, C. U. V.; PARENTE, C. V.; CÂMARA, J. R. F.; LESSA, F. G. N.; CAVALCANTE, I. M.; SOUSA, M. L. S. ; COUTO, . A. d. S. Tipologia e gênese dos minérios de ferro da fazenda angustura município de sobral-ce. In: **XXII Simpósio de Geologia do Nordeste**. Natal: Sociedade Brasileira de geologia núcleo nordeste, 2007. p. 264.

VIANA laudia Maria de P.; SOUSA, F. J. de; LIMA, K. A. de; NASCIMENTO, M. M. S. do. Secretaria de planejamento e gestão **Perfil Municipal de Sobral**. Fortaleza, 2017.

VIEIRA, C.; EMILIANO, J. Incorporação de pó de rocha sedimentar em massas para telhas cerâmicas-parte 1: efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 59, p. 389–394, 2013.

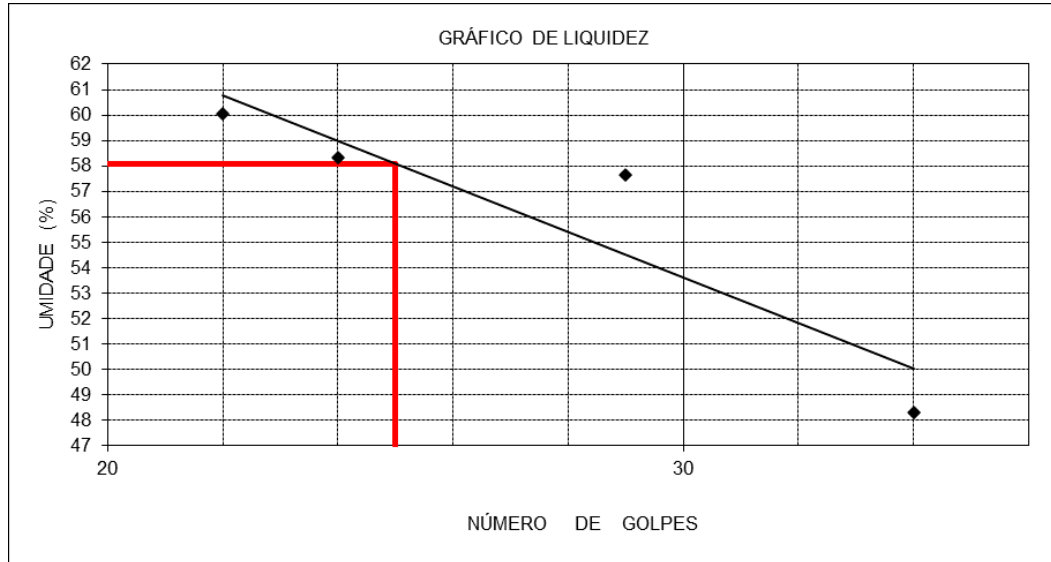
VIRTA, R. L. Annual report 1990: Clays, bureau of mines, u. s. department of the interior. **United States Environmental Protection Agency**, 1992. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/old/ap42/ch11/s20/reference/bref04_c11s20_ch2_1995.pdf>.

WESLEY, L. **Clays and Clay Minerals: Geological Origin, Mechanical Properties and Industrial Applications**. [S.l.]: Nova Science Publishers, Incorporated, 2014. (Earth Sciences in the 21st Century). ISBN 9781631177798.

WILSON, I. R.; SANTOS, H. d. S.; SANTOS, P. d. S. Caulins brasileiros: alguns aspectos da geologia e da mineralogia. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 44, p. 118–129, 1998.

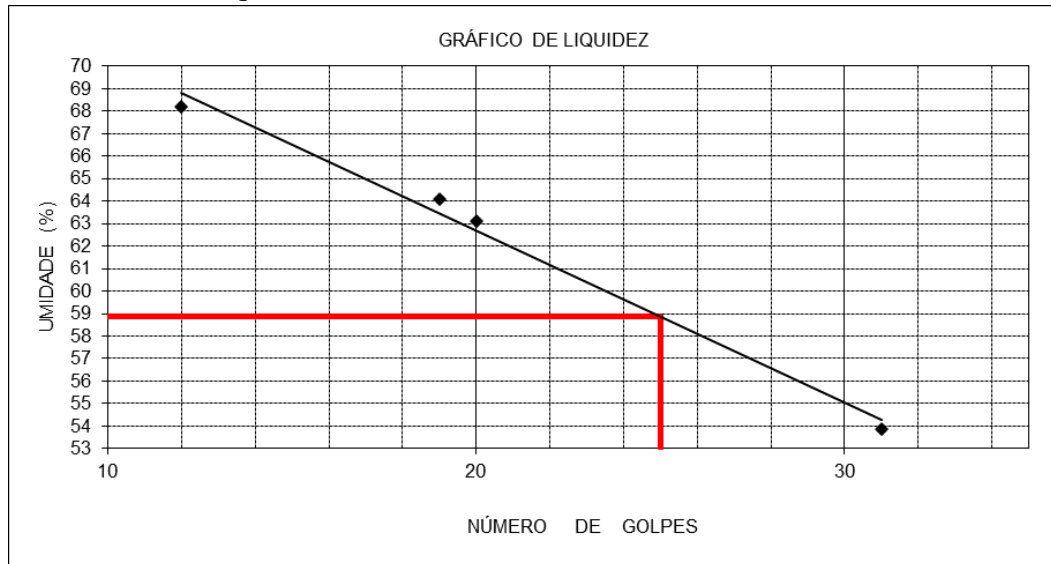
APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ

Figura 27 – Limite de liquidez amostra 1.



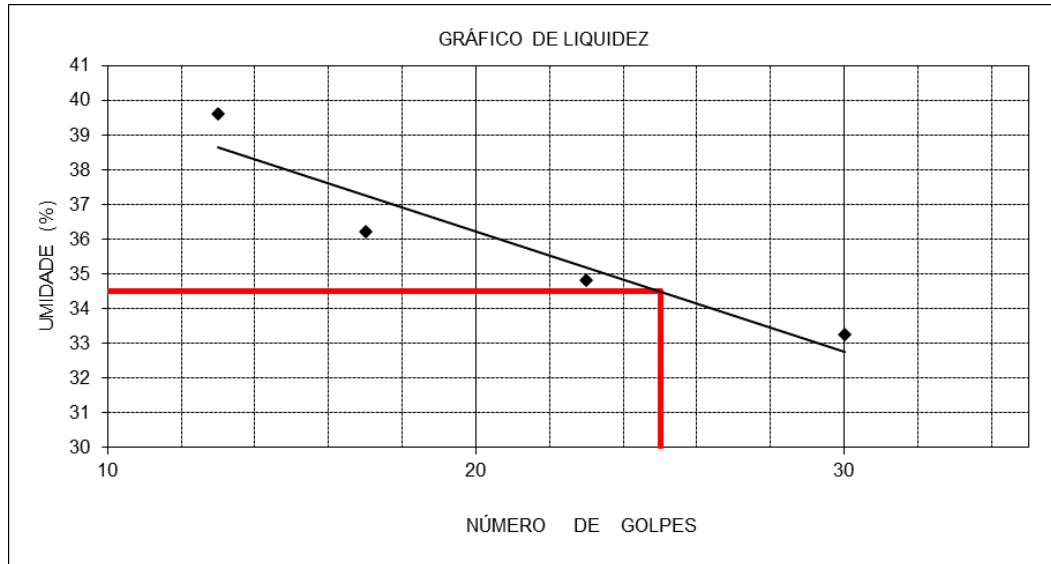
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 28 – Limite de liquidez amostra 1'.



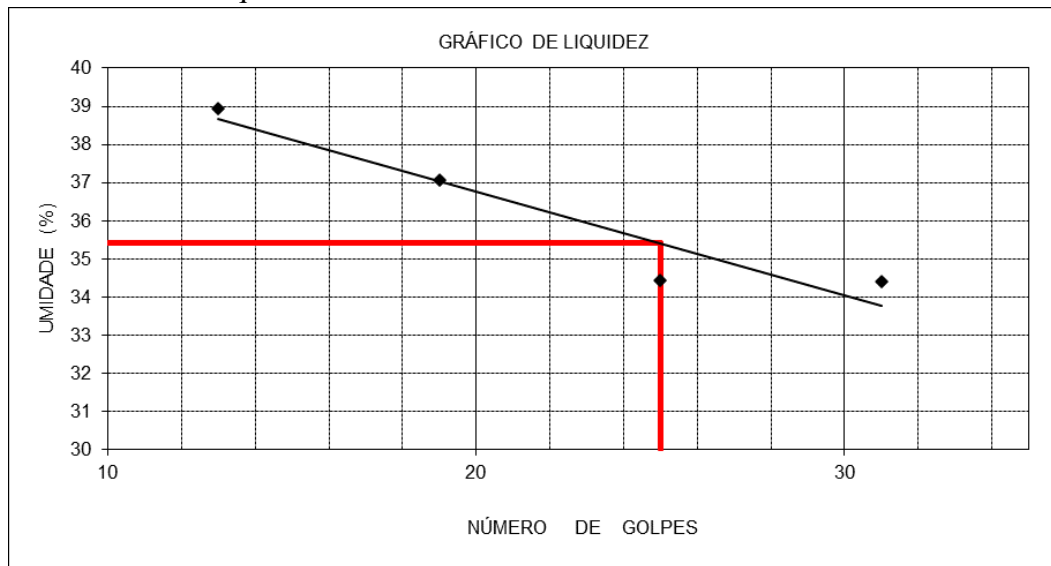
Fonte: Elaborado pelo autor (2021) ' - duplicata.

Figura 29 – Limite de liquidez amostra 2.



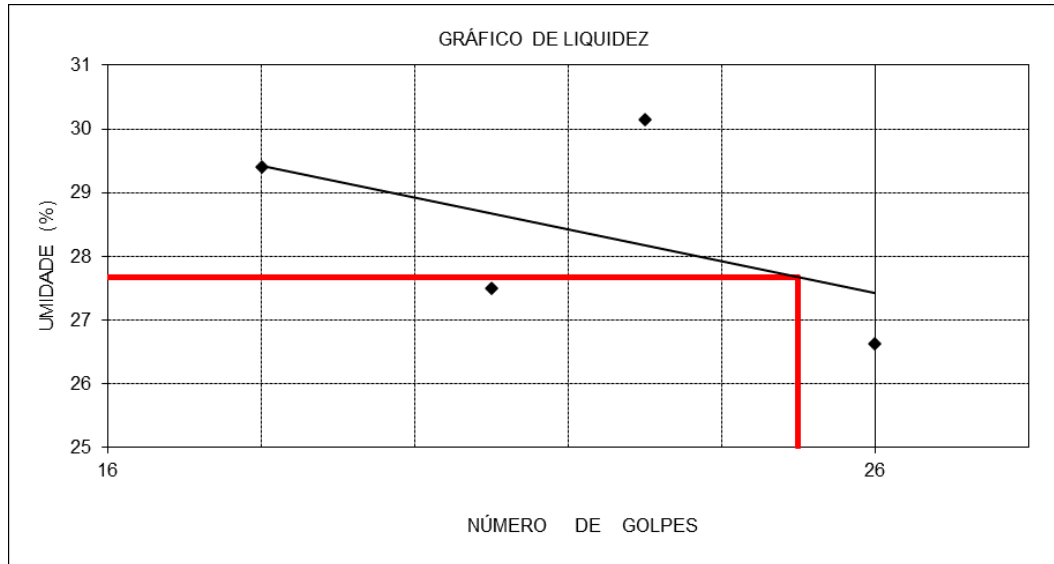
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 30 – Limite de liquidez amostra 2'.



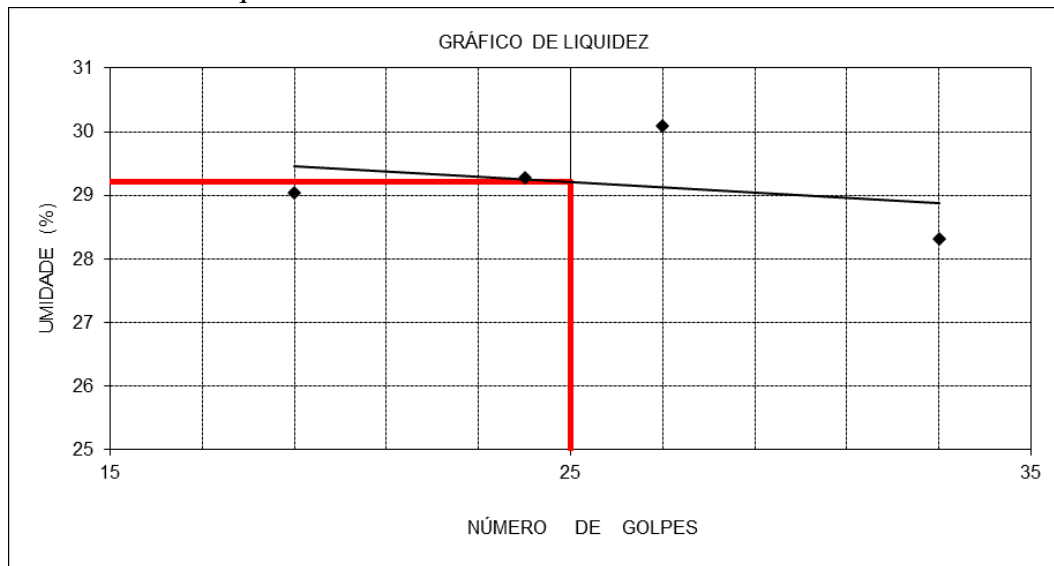
Fonte: Elaborado pelo autor (2021) ' - duplicata.

Figura 31 – Limite de liquidez amostra 3.



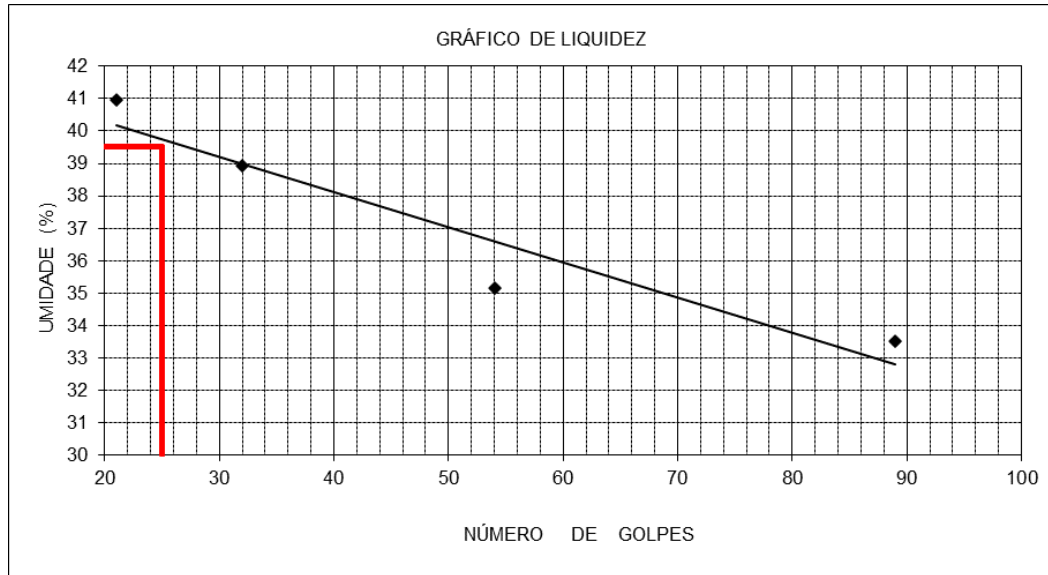
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 32 – Limite de liquidez amostra 3'.



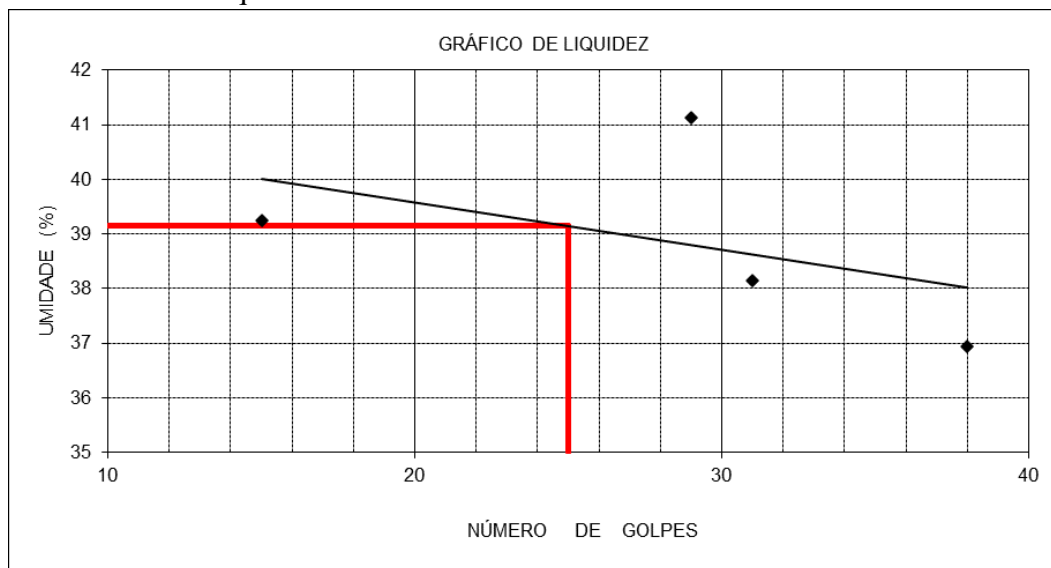
Fonte: Elaborado pelo autor (2021) ' - duplicata.

Figura 33 – Limite de liquidez amostra 4.



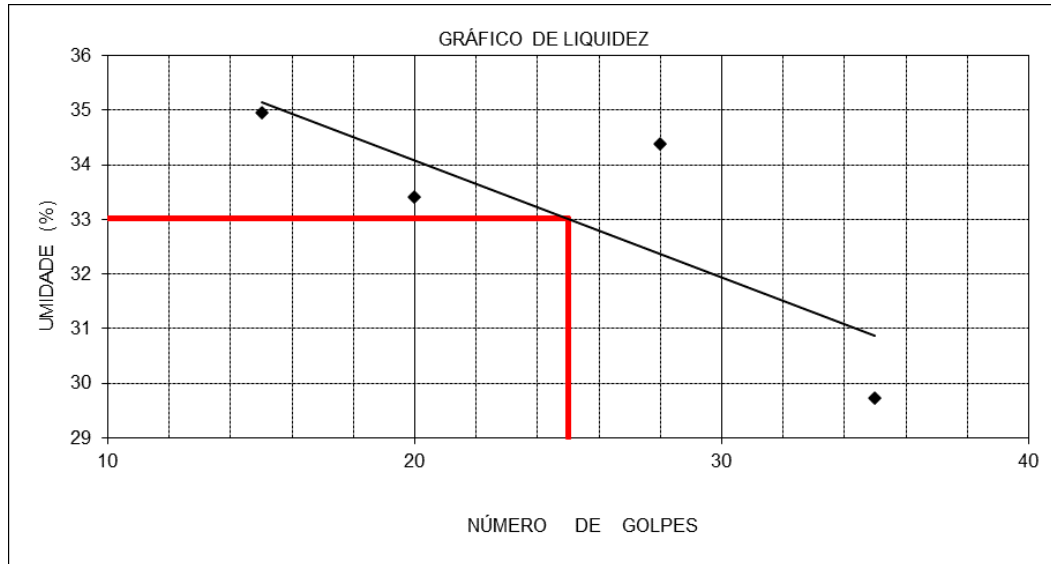
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 34 – Limite de liquidez amostra 4'.



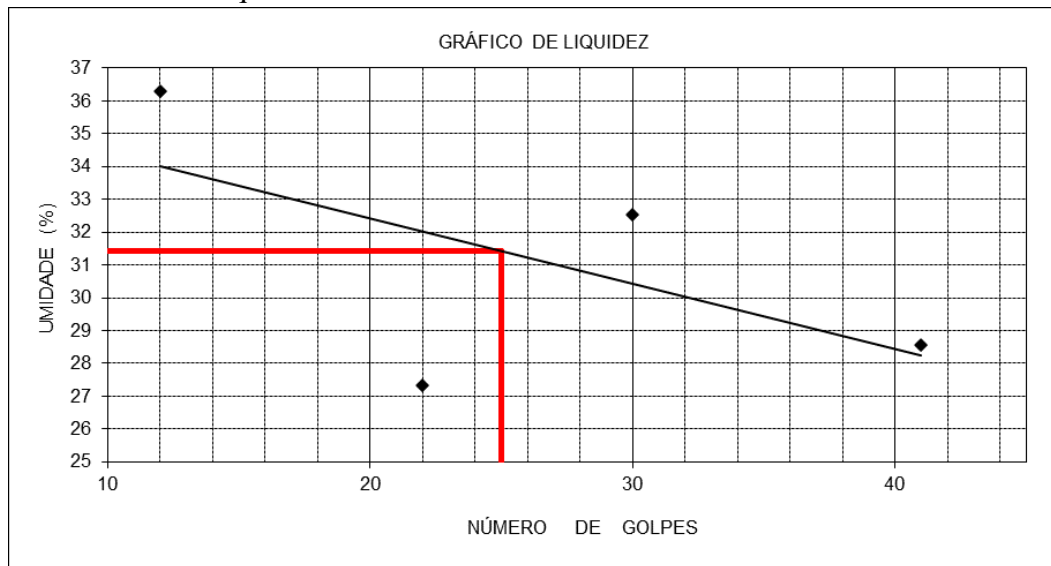
Fonte: Elaborado pelo autor (2021) ' - duplicata.

Figura 35 – Limite de liquidez amostra 5.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

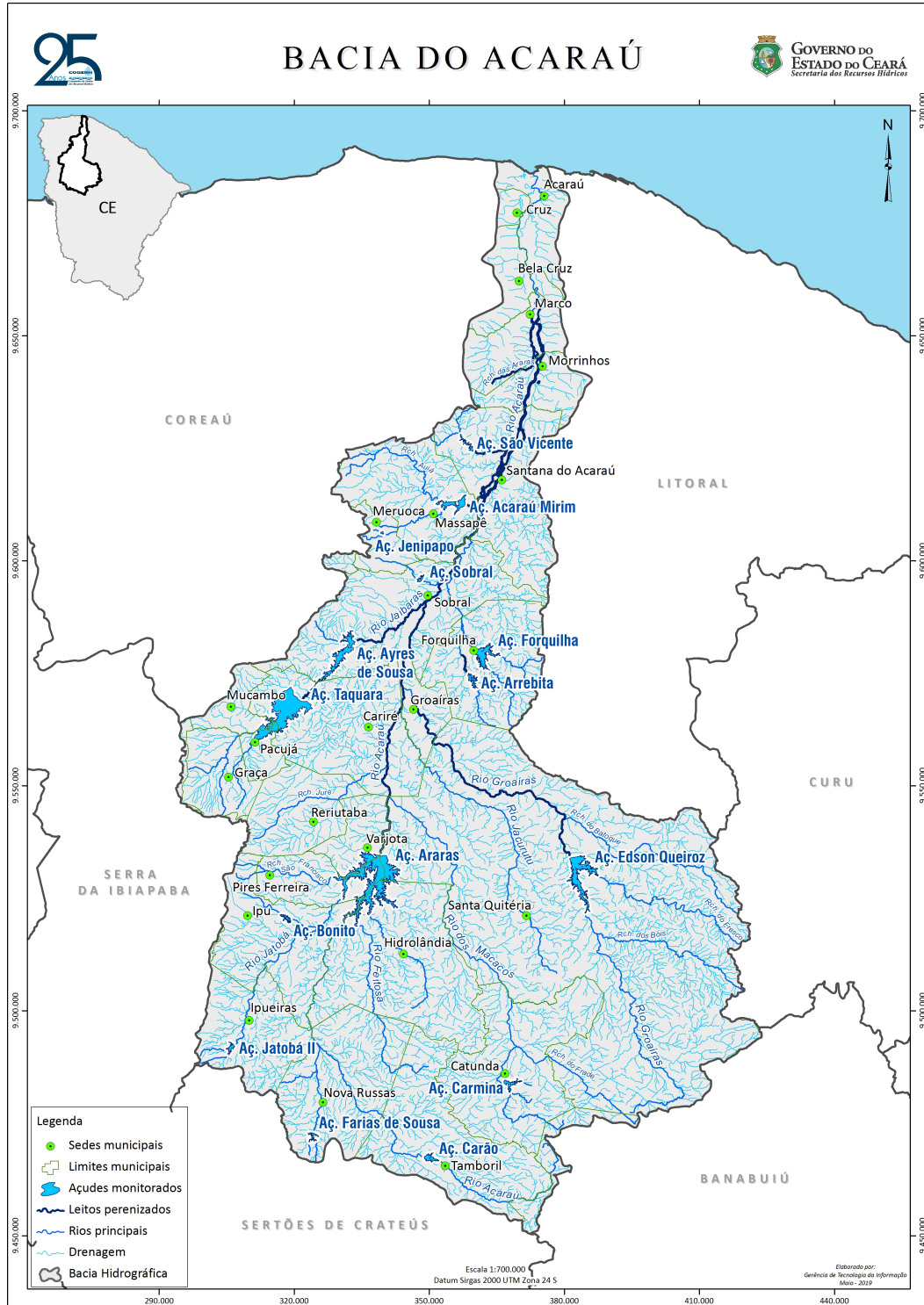
Figura 36 – Limite de liquidez amostra 5'.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021) - duplicata.

ANEXO A – BACIA HIDROGRÁFICA DO ACARAÚ.

Figura 37 – Bacia Hidrográfica de Acaraú.



Fonte: CEARÁ (2019)