



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS
GRADUAÇÃO DIRETORIA DE PESQUISA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – PIBIC : CNPq,
CNPq/AF, UFPA, UFPA/AF, PIBIC/INTERIOR, PARD, PIAD, PIBIT, PADRC E FAPESPA

RELATÓRIO TÉCNICO - CIENTÍFICO

Período : SETEMBRO/2023 a AGOSTO/2024

PARCIAL
 FINAL

IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do Projeto de Pesquisa: Rotas da mineração: Conhecendo os processos de beneficiamento de minérios do Pará

Nome do Orientador: Vitor Leão Santana

Titulação do Orientador: Professor Doutor

Faculdade: Faculdade de Ciência e Tecnologia

Instituto/Núcleo: Campus Universitário de Ananindeua - UFPA

Laboratório: Laboratório de Práticas Tecnológicas (LAPTEC)

Título do Plano de Trabalho: Caracterização do Resíduo de Caulim produzido em minerações do Pará e sua aplicação em Cimento Geopolimérico

Nome do Bolsista: Queren Lira Nascimento

Tipo de Bolsa :

- PIBIC/ CNPq
- PIBIC/CNPq – AF
- PIBIC /CNPq – Cota do pesquisador
- PIBIC/UFPA
- PIBIC/UFPA – AF
- PIBIC/ INTERIOR
- PIBIC/PARD
- PIBIC/PADRC
- PIBIC/FAPESPA
- PIBIC/ PIAD
- PIBIC/PIBIT

INTRODUÇÃO

A caracterização mineral é essencial na indústria e pesquisa mineral, oferecendo uma análise completa das propriedades físicas, químicas e mineralógicas das amostras. Tal análise é fundamental para entender a composição mineral de depósitos, guiar decisões durante exploração, extração e processamento (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). Identificar minerais específicos ajuda a criar estratégias mais eficientes com reagentes químicos, reduzindo custos e impacto ambiental.

Análises detalhadas contribuem para processos mais eficazes, aumentando a recuperação de minerais valiosos e melhorando a qualidade do produto final. Essa abordagem otimiza a lucratividade das operações e fortalece a sustentabilidade ao reduzir desperdícios e gerir recursos. Na pesquisa, a caracterização mineral impulsiona a inovação, fornecendo dados para novas tecnologias e métodos de processamento, conduzindo o progresso da indústria mineral. O estado do Pará desempenha um papel significativo na indústria do caulim, sendo uma das principais regiões produtoras deste minério no Brasil (CAMPOS; MONTEIRO; SILVA, 2018).

Este trabalho de pesquisa é orientado pelo objetivo inicial de investigar as características mineralógicas do rejeito de caulim duro proveniente da mineração na região do Rio Capim (Ipixuna do Pará/PA). Para tal, fez-se necessário o estudo teórico dos fundamentos básicos que envolvem o conhecimento do material estudado, assim como o entendimento das normas e metodologias que norteiam o adequado desenvolvimento dos processos experimentais.

Na condução desta pesquisa, a realização de ensaios de classificação granulométrica mostrou-se um importante método como parte da caracterização física do minério, possibilitando a construção da curva granulométrica, além de fornecer outros dados estatísticos. Ademais, amostras do material foram submetidas a análises de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), fornecendo imagens em alta resolução da superfície do minério, assim como resultados detalhados sobre a morfologia, estrutura e distribuição dos grãos, bem como informações da composição química por meio da análise EDS.

JUSTIFICATIVA

A atividade mineradora do caulim no Brasil é de grande importância socioeconômica. O desenvolvimento dessa atividade mineralógica de diversos setores no país e, principalmente, na Amazônia proporciona uma vasta área de estudo desses minérios, em especial do Caulim. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2009) o setor mineralógico do Caulim na Amazônia envolve minas que produzem caulim de alta qualidade.

No Pará, a Imerys possui a maior planta de beneficiamento de Caulim do mundo. A indústria do papel consome 47% da produção mundial de Caulim, sendo 33% para revestimento ou cobertura ‘coating’ e 14% para carga ‘filler’ (BARATA; DAN MOLIN, 2002). Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), as principais reservas de caulim que existem no Brasil, cerca de 98%, estão localizadas nos estados do Pará e Amazonas, que totalizaram aproximadamente 7 bilhões de toneladas no ano de 2017 (CAMPOS et al., 2018).

No caso do beneficiamento de caulim, dois tipos de rejeitos são gerados. A primeira é constituída por areia de quartzo, proveniente do processo de britagem (cerca de 35%); no segundo tipo, é uma fase caulínica, cerca de 10% da fração total da planta de Barcarena, este caulim é proveniente das etapas de separação magnética de resíduos e frações grossas.

Estima-se que no Estado do Pará as quantidades depositadas deste resíduo caulínico processam milhões de toneladas. Esses números são significativos e apresentam um problema financeiro e ambiental. As deposições se tornam onerosas porque são realizadas em lagoas de sedimentação, que requerem permanentes obras de movimentação de terra e grandes áreas para suas construções, além, é claro, do constante monitoramento para evitar vazamentos ocasionados pela ruptura das barragens de contenção.

OBJETIVOS

Com base na justificativa para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, busca-se promover informações relevantes para o reaproveitamento do rejeito na produção de pastas e argamassas baseadas em geopolímeros. Espera-se que os resultados obtidos não apenas contribuirão para a aplicação diversificada desse material, mas também possibilitarão o tratamento e adequação do produto para uso industrial. Dessa forma, almeja-se aprimorar o processo de beneficiamento mineral, otimizando a exploração das jazidas na região e promovendo a sustentabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material objeto do estudo é o caulim do tipo duro (flint) que, por não atingir os critérios de qualidade exigidos para a indústria para a cobertura de papel, é tratado como rejeito. Este material foi extraído da região do Rio Capim pela empresa Imerys Rio Capim Caulim (IRCC), no município de Ipixuna do Pará/PA. O minério foi tratado partindo de sua forma bruta, isto é, preservadas as características apresentadas no momento de sua extração. No âmbito deste estudo de caracterização mineral, foram seguidas normas técnicas reconhecidas para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados. As etapas metodológicas incluíram:

- Preparação de amostras, onde as amostras de rejeito de caulim duro foram coletadas e preparadas de acordo com as diretrizes estabelecidas por normas técnicas como NBR NM 26:2000: Agregados - Amostragem e NBR NM 27:2000: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório da ABNT.

- Análise granulométrica, a qual a determinação do tamanho de partícula foi conduzida seguindo a norma ABNT NBR NM 248:2001: Agregados - Determinação da Composição Granulométrica; ABNT NBR NM 6502/1995: Rochas e solos; ABNT NBR NM 66:1996: Agregados - Constituintes mineralógicos dos agregados naturais - Terminologia.

As amostras 1, 2, 3 e 4 foram classificadas pelo método de peneiramento a seco. As amostras 1 e 2 passaram por uma série de 15 peneiras (tabelas 1 e 3), enquanto as amostras 3 e 4 passaram por 10 peneiras (tabela 4) conforme a norma NBR NM 248 (série normal). As amostras 5 e 6 foram classificadas pelo método do peneiramento a úmido. A amostra 5 passou pela série de 15 peneiras, enquanto a amostra 6 passou pelo total de 20 peneiras.

- Microscopia Óptica, sendo observadas características morfológicas e estruturais, bem como a distribuição dos grãos.
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que permitiu a obtenção de imagens em alta resolução da superfície do minério. A análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva foi empregada para determinar a composição química do material.
- Interpretação dos Resultados: Os dados obtidos foram interpretados com base em teorias mineralógicas e geológicas relevantes, considerando a mineralogia do caulim e suas implicações na aplicação industrial.

Essa abordagem metodológica, alinhada às normas técnicas, assegura a validade científica e a aplicabilidade dos resultados no contexto da indústria mineral.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o resultado das análises, são apresentadas as interpretações a partir das informações estatísticas dos ensaios de granulometria a seco e a úmido. São apresentadas tabelas, histogramas, curvas granulométricas, imagens de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), bem como a análise EDS das amostras. Os resultados de diferentes ensaios podem ser comparados para fins de verificação da confiabilidade dos resultados.

No total, foram realizados seis ensaios de classificação granulométrica, sendo quatro destes utilizando o método do peneiramento a seco, onde as amostras 1 e 2 passaram pelo mesmo conjunto de quinze peneiras, enquanto as amostras 3 e 4 passaram por 10 peneiras, segundo a norma ABNT NBR NM 248. Os outros dois ensaios foram realizados pelo método do peneiramento a úmido, onde a amostra 5 passou pelo conjunto de 15 peneiras, enquanto a amostra 6 passou pelo total de 20.

Análise granulométrica - ensaio a seco: amostras 1 e 2

Tabela 1: Dados do peneiramento da Amostra 1.

Abertura da malha (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (g)	Passante (%)
37,50	0,00	0,00	0,00	497,97	100,00
4,80	109,36	21,96	21,96	388,61	78,04
3,40	30,56	6,14	28,10	358,05	71,90
2,40	41,04	8,24	36,34	317,01	63,66
2,00	21,18	4,25	40,59	295,83	59,41
1,42	46,96	9,43	50,02	248,87	49,98
0,85	38,80	7,79	57,81	210,07	42,19
0,30	84,78	17,03	74,84	125,29	25,16
0,25	36,77	7,38	82,22	88,52	17,78
0,18	22,62	4,54	86,77	65,90	13,23
0,15	33,85	6,80	93,56	32,05	6,44
0,10	13,38	2,69	96,25	18,67	3,75
0,07	3,82	0,77	97,02	14,85	2,98
0,05	13,71	2,75	99,77	1,14	0,23
0,04	1,14	0,23	100,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	-----	-----
Total	497,97	100,00	-----	-----	-----

Fonte: Autor

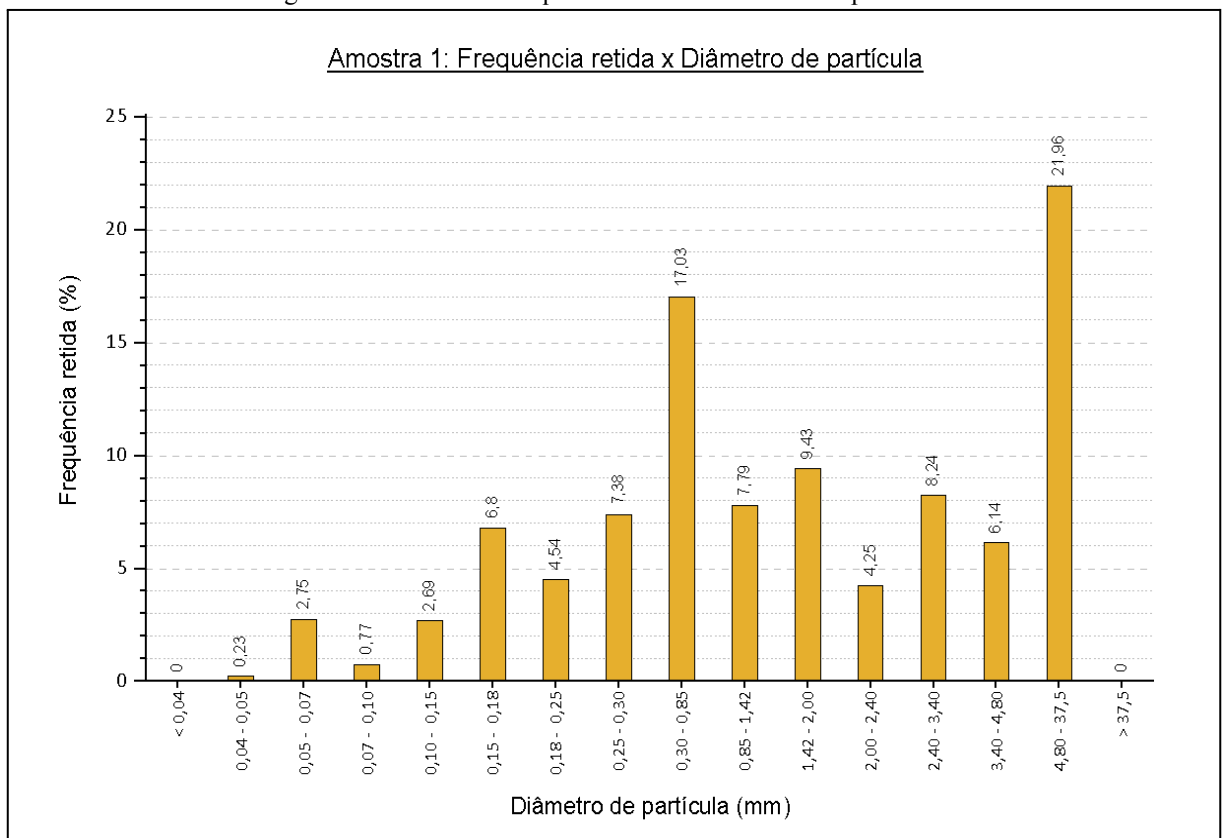
A Figura 1 representa a frequência (porcentagem de massa) do material que ficou retido em cada uma das peneiras com aberturas em milímetros. O eixo horizontal apresenta os intervalos em que os grãos estão distribuídos. Enquanto a Figura 2 fornece a curva granulométrica para o ensaio da amostra, onde é representado a porcentagem do material passante acumulado para cada uma das peneiras. A Tabela 2, baseada na norma NBR 6502 da ABNT, fornece informações sobre a granulometria utilizada como parâmetro neste estudo.

Os dados foram obtidos a partir da frequência relativa em tabela de dados. Os gráficos de frequência foram plotados com o auxílio do software Origin. Para cada um dos ensaios são apresentados graficamente os valores dos resultados obtidos.

Tabela 2: Classificação granulométrica (mm) de solos (ABNT NBR 6502/1995).

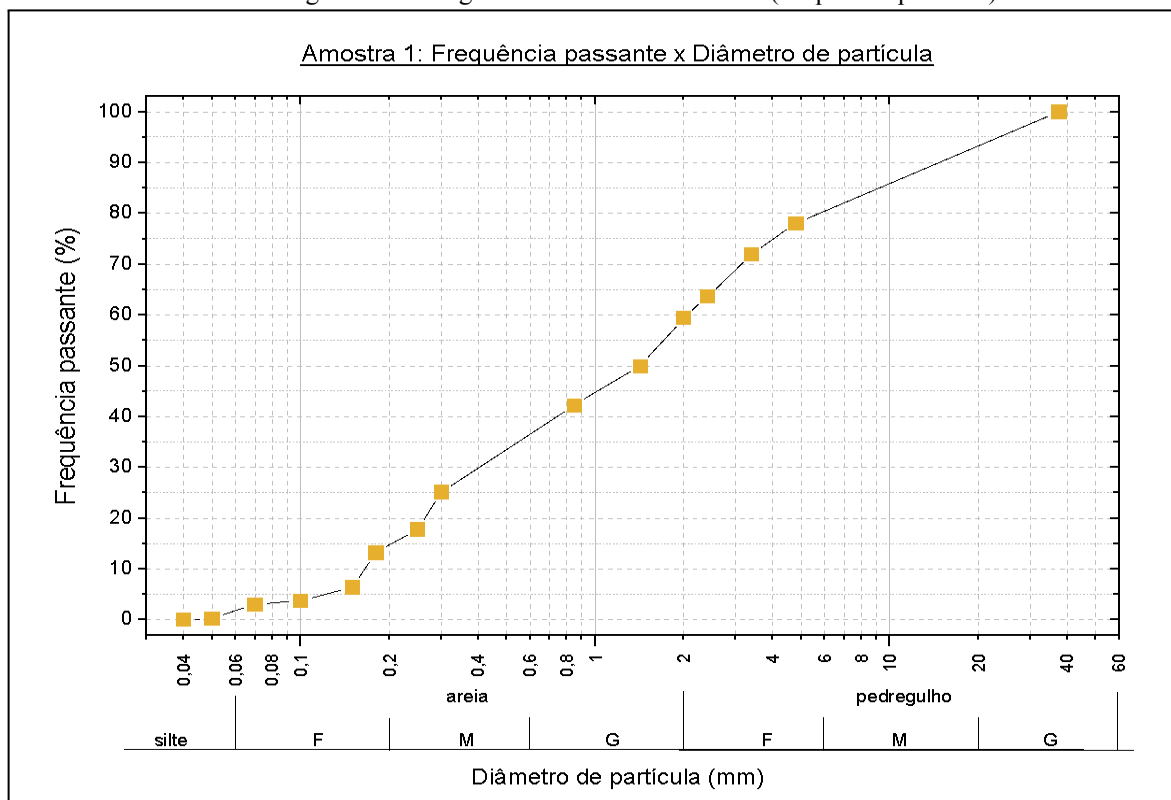
mm	argila	silte	areia			pedregulho			pedra-de-mão
			F	M	G	F	M	G	
0,002									
0,06									
0,2									
0,6									
2,0									
6,0									
20,0									
60,0									
200,0									

Figura 1: Amostra 1 - Frequência retida x Diâmetro de partícula.



Fonte: Autor

Figura 2: Curva granulométrica da amostra 1 (frequência passante).



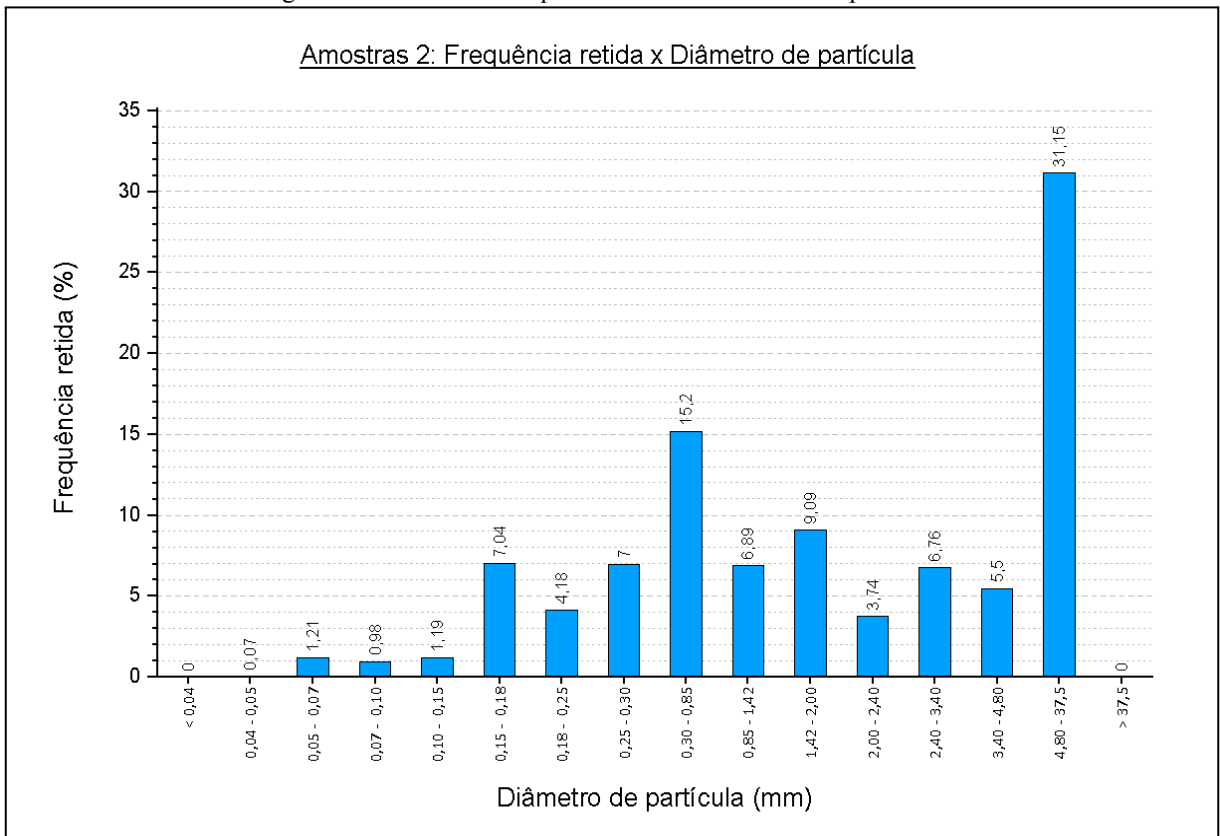
Fonte: Autor

Tabela 3: Dados do peneiramento da Amostra 2.

Abertura da malha (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (g)	Passante (%)
37,50	0,00	0,00	0,00	498,48	100,00
4,80	155,27	31,15	31,15	343,21	68,85
3,40	27,43	5,50	36,65	315,78	63,35
2,40	33,69	6,76	43,41	282,09	56,59
2,00	18,64	3,74	47,15	263,45	52,85
1,42	45,30	9,09	56,24	218,15	43,76
0,85	34,36	6,89	63,13	183,79	36,87
0,30	75,78	15,20	78,33	108,01	21,67
0,25	34,88	7,00	85,33	73,13	14,67
0,18	20,86	4,18	89,51	52,27	10,49
0,15	35,07	7,04	96,55	17,20	3,45
0,10	5,92	1,19	97,74	11,28	2,26
0,07	4,90	0,98	98,72	6,38	1,28
0,05	6,02	1,21	99,93	0,36	0,07
0,04	0,36	0,07	100,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	-----	-----
Total	498,48	100,00	-----	-----	-----

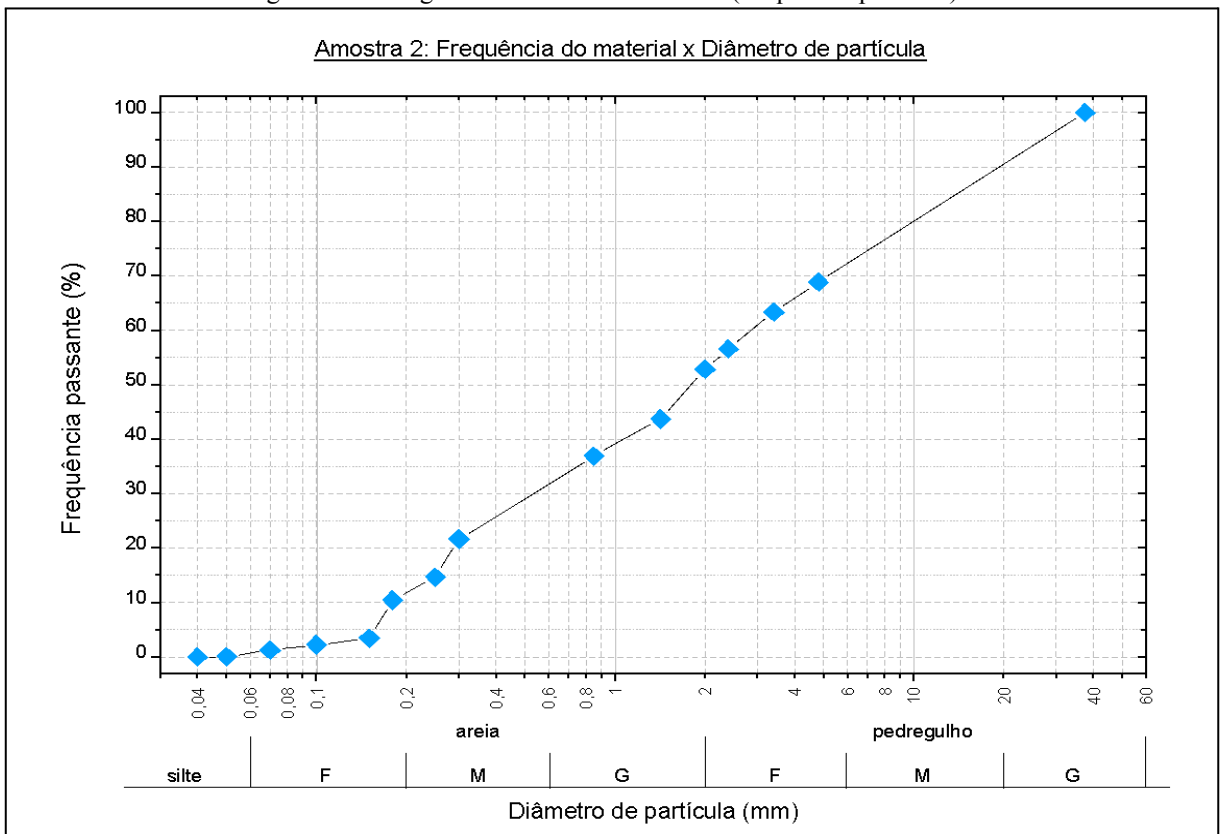
Fonte: Autor

Figura 3: Amostra 2 - Frequência retida x Diâmetro de partícula.



Fonte: Autor

Figura 4: Curva granulométrica da amostra 2 (frequência passante).



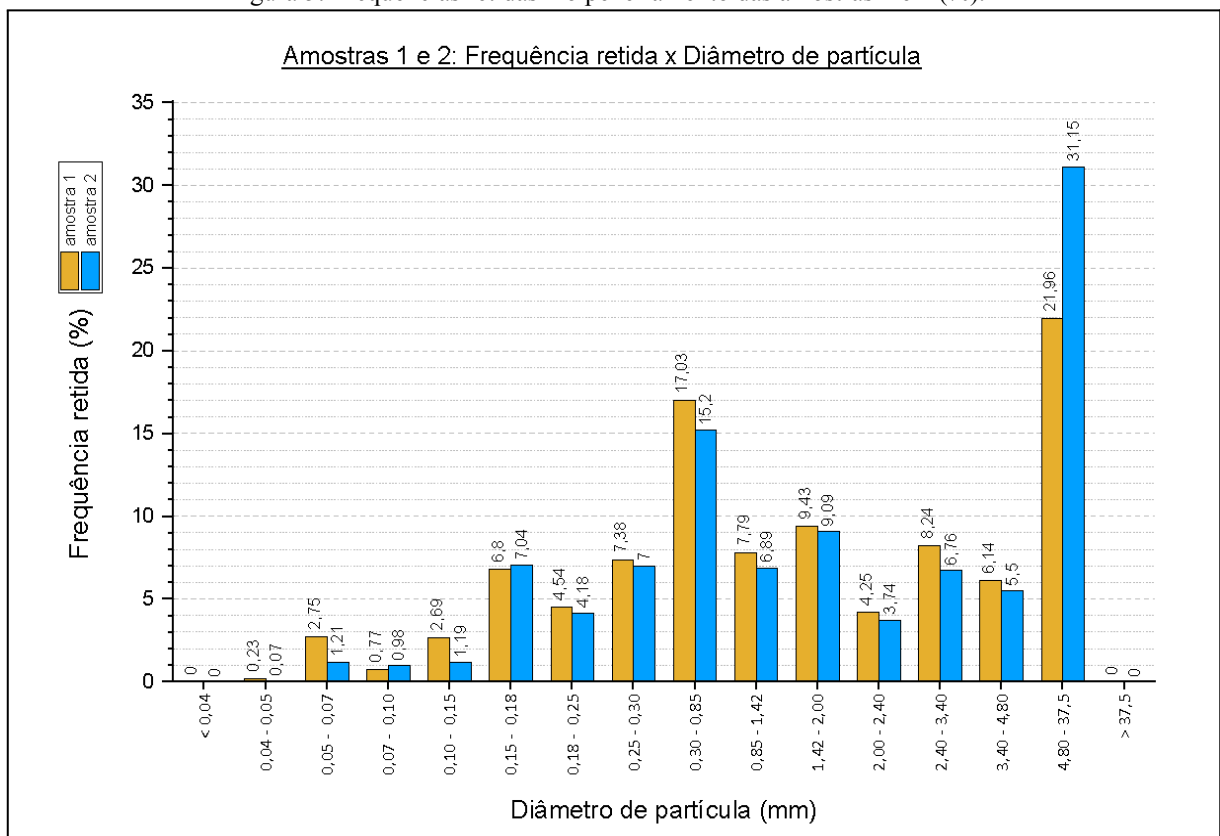
Fonte: Autor

Comparando os histogramas dos ensaios das amostras 1 e 2 (Figura 5), verifica-se que, conforme esperado, os resultados apresentam um padrão similar com algumas variações nas frequências observadas para cada fração granulométrica. Destaca-se uma variação superior a 9% entre as massas retidas na peneira de 4,80 mm. Essa ocorrência é explicada pela distribuição de impurezas no material, que se apresentam na forma de fragmentos de rochas.

Os gráficos da frequência retida fornecem uma boa noção de onde se concentram as frações granulométricas do material. Os maiores índices são dos materiais retidos nas peneiras de 4,8 mm (pedregulho) e 0,3 mm (areia), e uma boa distribuição entre os demais intervalos.

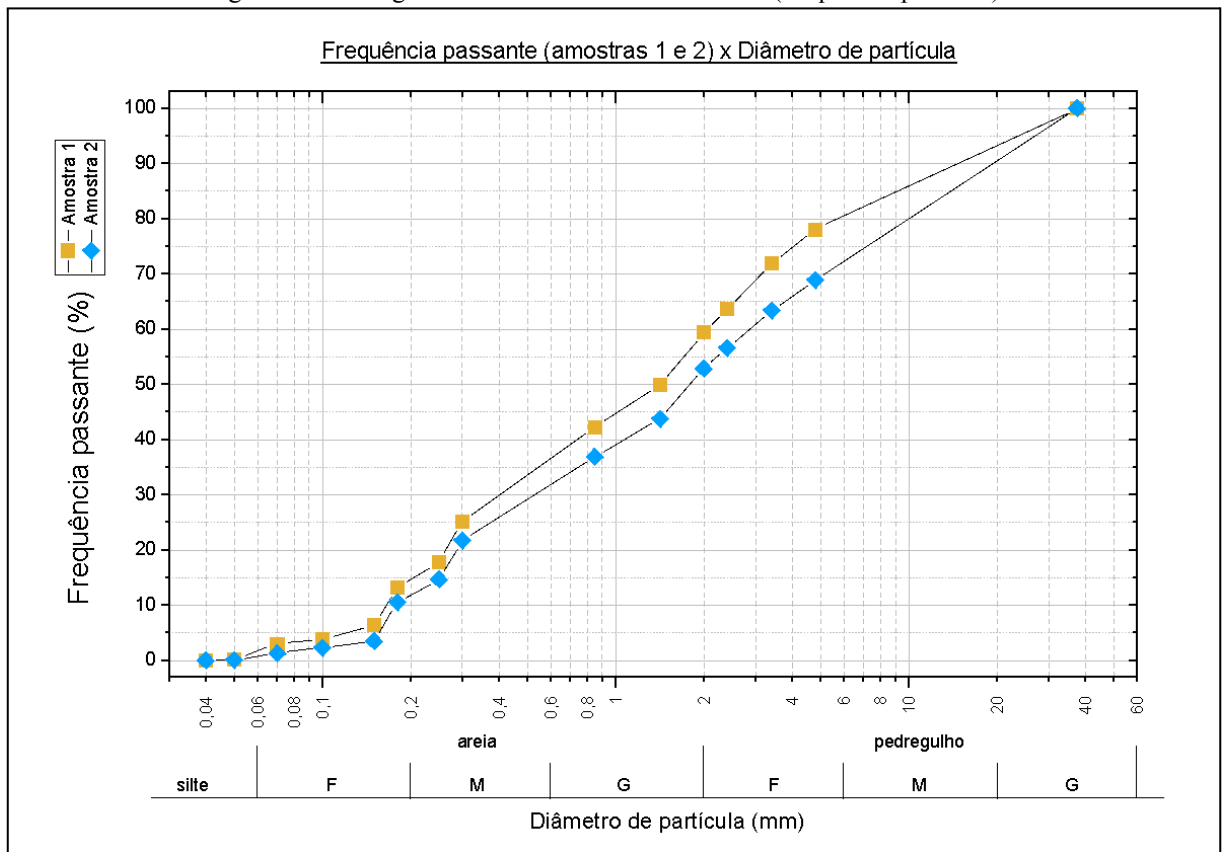
As curvas granulométricas obtidas apresentam um padrão típico de solos bem graduados, portanto é possível inferir que o material analisado se trata de um solo de granulação uniforme (ou granulação aberta). Com base na norma técnica para a classificação da granulometria dos solos, o ensaio indica um solo arenoso-pedregoso com presença de material siltoso e considerável presença de finos de aspecto argiloso.

Figura 5: Frequências retidas no peneiramento das amostras 1 e 2 (%).



Fonte: Autor

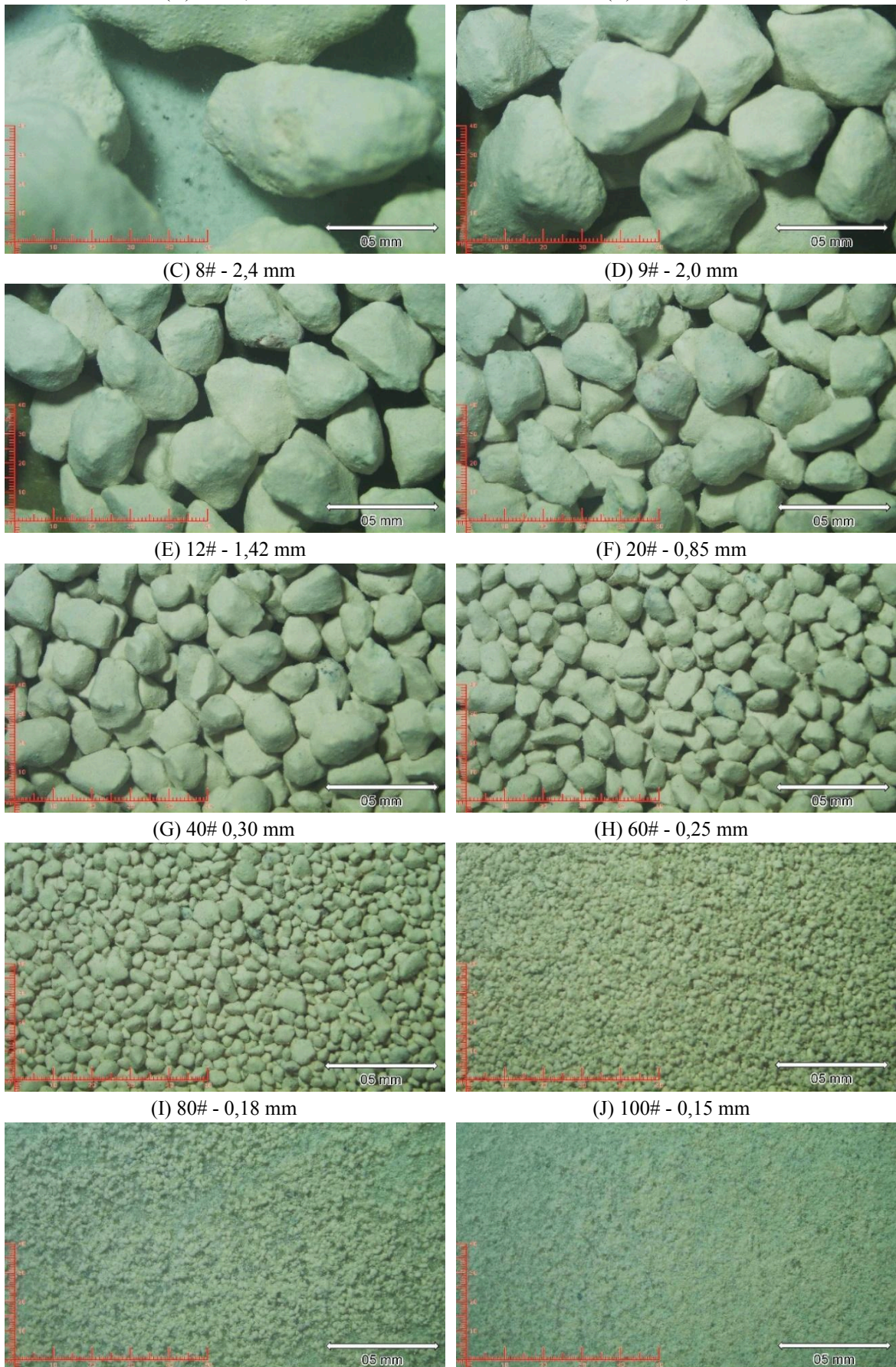
Figura 6: Curvas granulométricas das amostras 1 e 2 (frequência passante).

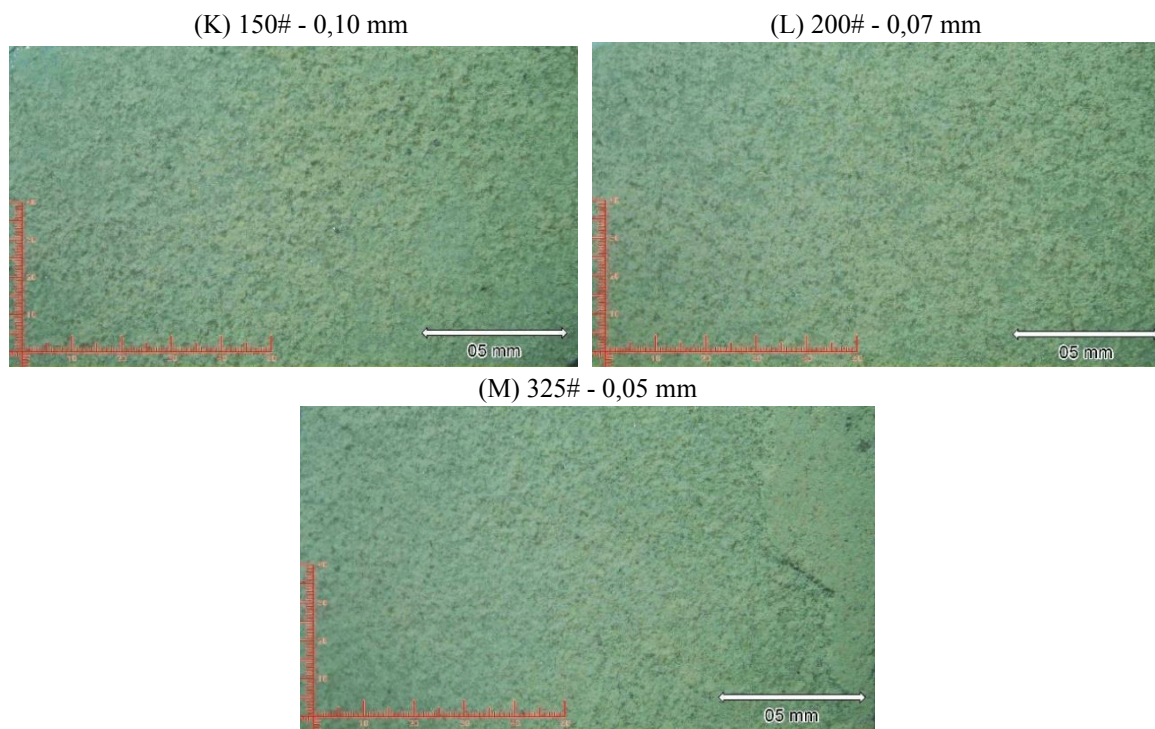


Fonte: Autor

Amostras das frações granulométricas foram submetidas a observação em um microscópio óptico a fim de visualizar algumas características como distribuição granulométrica, morfologia, coesão, além de suas fases (Figura 7). Através do exame foi possível observar que particulados finos estavam aderidos a superfície de grãos maiores devido a força de atração (eletrostática) entre as partículas. Em razão disso, optou-se por submeter uma amostra do minério bruto a um ensaio a úmido para minimizar aglomerados e adesão entre as partículas, assim melhorando os resultados de maneira a construir uma curva granulométrica que represente as características do minério com maior rigor.

Figura 11: Amostras das frações submetidas ao microscópio óptico.





Fonte: Autor

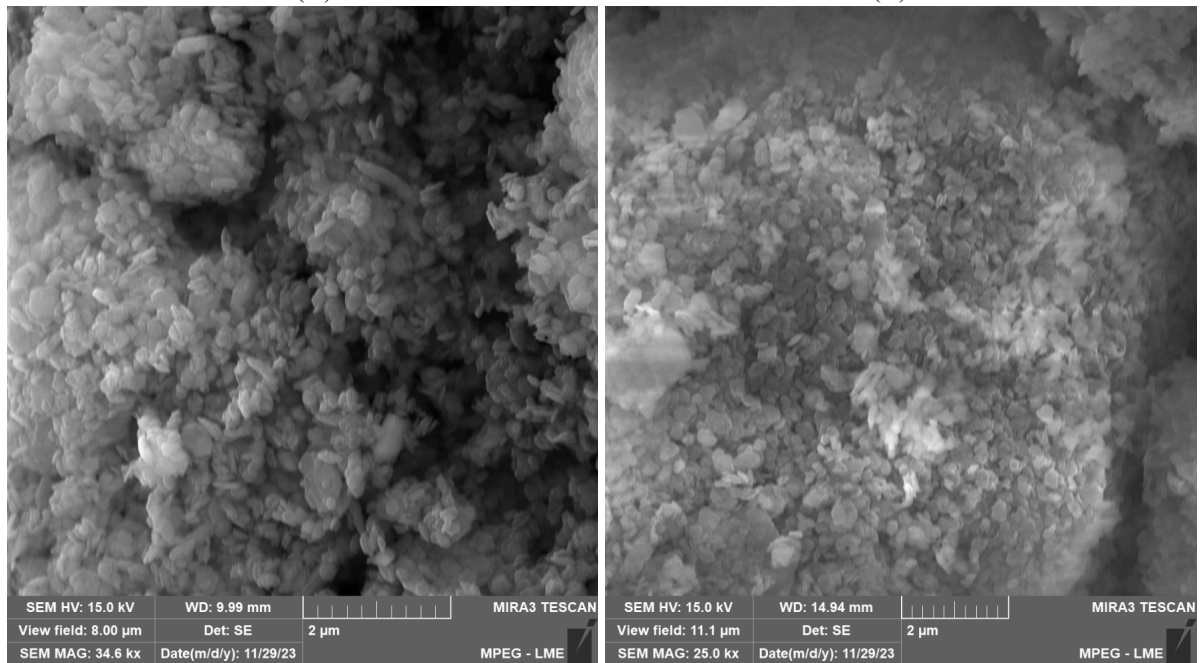
Na análise microscópica do resíduo de caulim, observou-se que, em conformidade com a análise granulométrica, o material pode ser considerado bem graduado, apresentando uma distribuição equilibrada entre partículas de diferentes tamanhos. As frações mais grosseiras que constituem as frações de pedregulhos e pedras-de-mão, consistem predominantemente em fragmentos de rocha. A coloração avermelhada desses fragmentos sugere a presença de óxidos de ferro. Essa característica pode ter implicações significativas na qualidade e na aplicação industrial do caulim.

A Figura 8 representa as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de caulim duro das frações retidas nas peneiras de 2,36 mm (A) e 0,038 mm (B). Nessas amostras, é possível observar que os grãos de caulinita apresentam-se na forma de pseudo-hexágonos empilhados, estrutura que é conhecida como booklet. É possível observar que a dimensão média dos cristalitos de caulinita é menor que 0,5 micrômetros. Nas imagens, verifica-se também a presença de estruturas conhecidas como “gel”, as quais indicam a presença de materiais que se encontram em processo de alteração, onde minerais primários darão origem a minerais secundários.

A análise foi complementada pela técnica de espectroscopia de dispersão de energia – EDS, obtendo informações da composição química do material (Figura 9). As principais impurezas observadas foram ferro e titânio. Foi apontada também a presença de carbono,

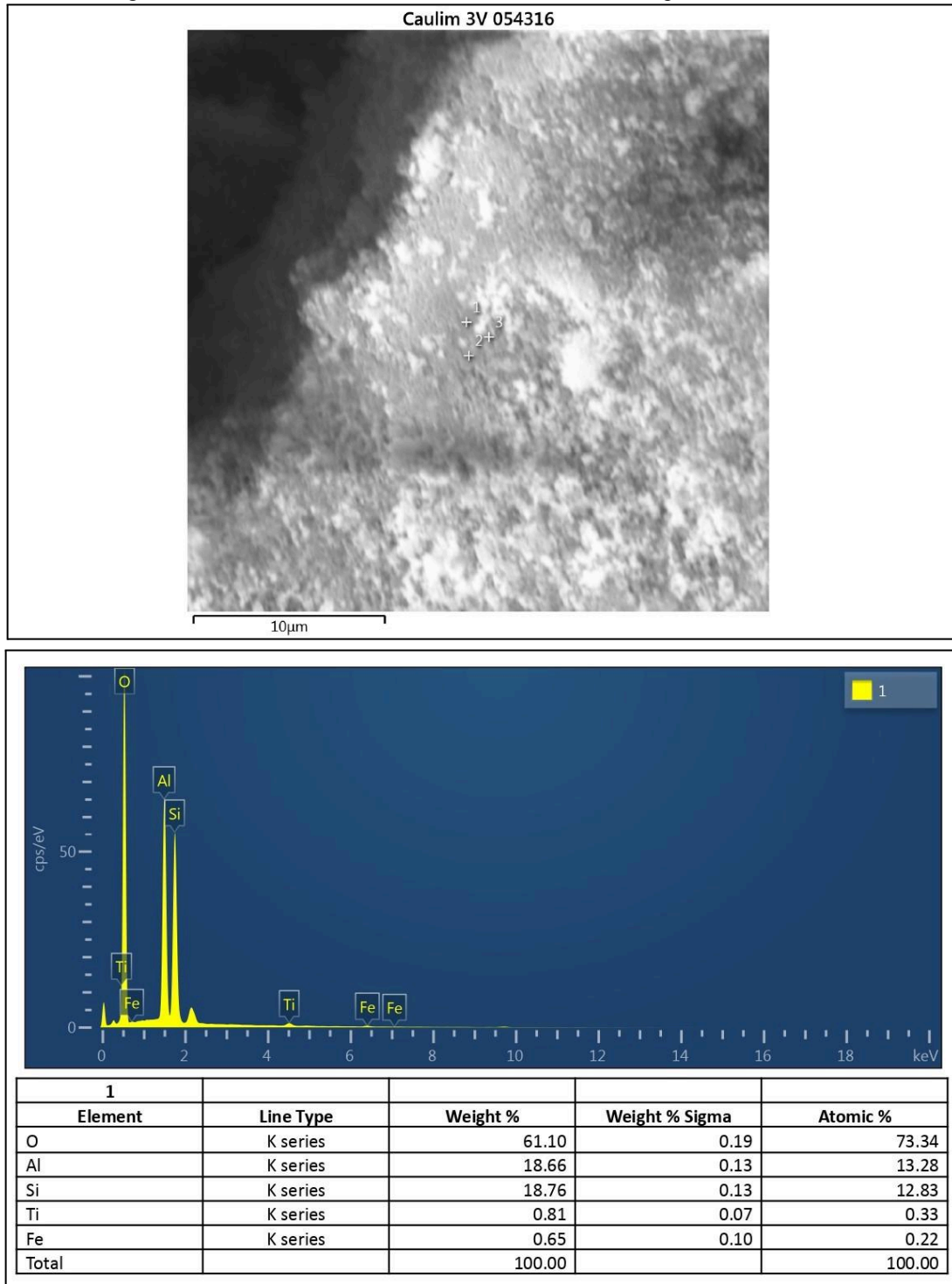
entretanto, o alto índice observado é devido ao processo de preparação da amostra para a análise MEV, pois o recobrimento por carbono (ou ouro) é necessário para tornar a amostra condutiva e evitar o acúmulo de carga elétrica durante a análise.

Figura 8: Imagens de MEV das amostras de caulim duro (a) 8# (b) 400#.
(A) (B)



Fonte: Autor

Figura 9: Análise EDS da amostra de caulim duro retida na peneira de 0,25 mm.



Fonte: Autor

Análise granulométrica - ensaio a seco: amostras 3 e 4

No presente estudo, foram realizados dois ensaios distintos para determinar a granulometria de amostras de caulim duro: um ensaio detalhado utilizando uma ampla série de peneiras e um ensaio conforme a norma ABNT NBR NM 248, que estabelece os requisitos para a composição granulométrica de agregados para concreto.

O primeiro ensaio (amostras 1 e 2) foi conduzido utilizando uma grande série de peneiras, com o objetivo de obter uma caracterização granulométrica detalhada do resíduo de caulim duro. Este procedimento permitiu uma análise minuciosa da distribuição das partículas, fornecendo dados precisos sobre a variação de tamanhos presentes no material. A realização deste ensaio é fundamental para compreender as propriedades físicas do solo, como sua distribuição de tamanho, que influencia diretamente a reatividade e a eficiência na formação da matriz geopolimérica.

O segundo ensaio (amostras 3 e 4) foi realizado utilizando as peneiras especificadas pela norma ABNT NBR NM 248, que determina a composição granulométrica de agregados para concreto. A escolha desta norma se justifica pela necessidade de comparar os resultados obtidos com os padrões estabelecidos para agregados utilizados em concretos convencionais. Esta comparação é interessante para avaliar a adequação do caulim duro em substituição aos agregados tradicionais, garantindo que o material atenda aos requisitos técnicos e de desempenho esperados.

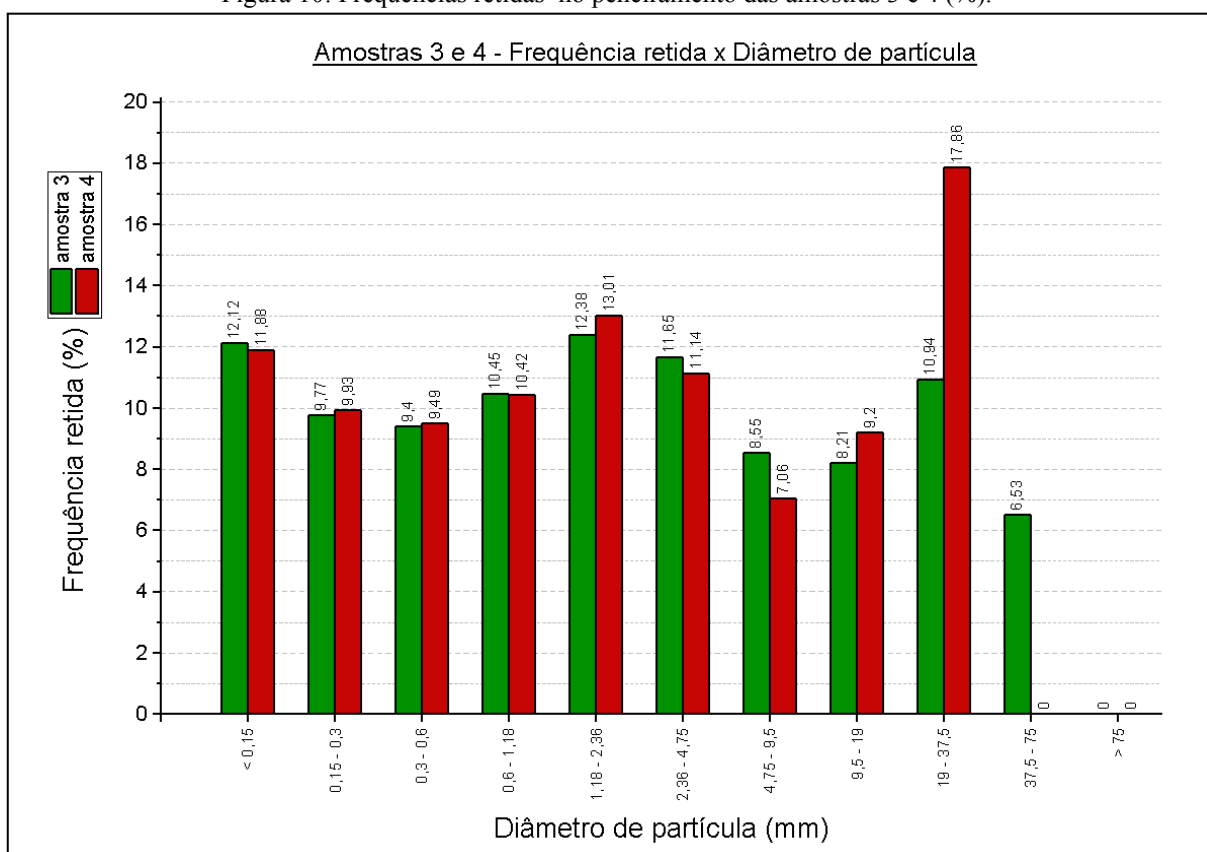
A condução de ambos os ensaios permite uma análise comparativa abrangente, fornecendo uma base sólida para a avaliação da adequação do caulim duro em aplicações de cimento geopolimérico. O ensaio detalhado oferece uma visão aprofundada da granulometria, enquanto o ensaio conforme a norma ABNT NBR NM 248 assegura a conformidade com os padrões industriais. Assim, as tabelas 4 e 5 e figuras 10 e 11 representam os resultados do ensaio segundo a norma técnica.

Tabela 4: Dados do peneiramento das amostra 3 e 4.

Abertura da malha (mm)	Retido - amostra 3 (g)	Retido - amostra 3 (%)	Retido - amostra 4 (g)	Retido - amostra 4 (%)	Passante - amostra 3 (g)	Passante - amostra 3 (%)	Passante - amostra 4 (g)	Passante - amostra 4 (%)
75,0	0,00	0,00	0,00	0,00	499,21	100,00	499,16	100,00
37,5	32,58	6,53	0,00	0,00	466,63	93,47	499,16	100,00
19,0	54,60	10,94	89,17	17,86	412,03	82,54	409,99	82,14
9,50	40,98	8,21	45,94	9,20	371,05	74,33	364,05	72,93
4,75	42,70	8,55	35,24	7,06	328,35	65,77	328,81	65,87
2,36	58,17	11,65	55,62	11,14	270,18	54,12	273,19	54,73
1,18	61,81	12,38	64,95	13,01	208,37	41,74	208,24	41,72
0,60	52,17	10,45	51,99	10,42	156,20	31,29	156,25	31,30
0,30	46,92	9,40	47,39	9,49	109,28	21,89	108,86	21,81
0,15	48,76	9,77	49,56	9,93	60,52	12,12	59,30	11,88
0,00	60,52	12,12	59,30	11,88	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	499,21	100,00	499,16	100,00	-----	-----	-----	-----

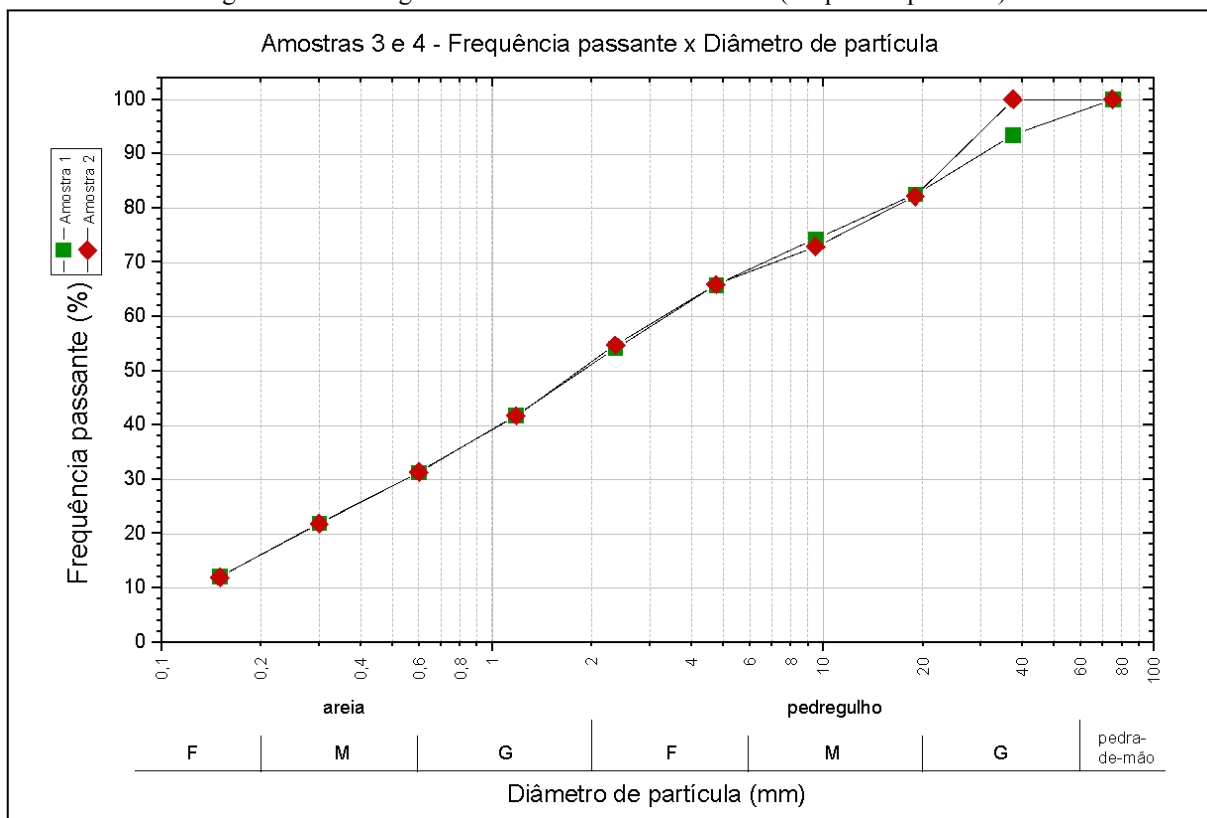
Fonte: Autor

Figura 10: Frequências retidas no peneiramento das amostras 3 e 4 (%).



Fonte: Autor

Figura 11: Curvas granulométricas das amostras 3 e 4 (frequência passante).



O conhecimento dos diâmetros médios é uma informação interessante para aplicação em cimentos, dependendo do contexto específico e das exigências do projeto. A distribuição granulométrica apresentada nesta análise sugere uma boa variação de tamanhos de partículas, o que pode contribuir para uma melhor trabalhabilidade do concreto. Partículas menores ajudam a preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em uma mistura mais coesa e fácil de manusear, por exemplo.

A presença de partículas de diferentes tamanhos pode melhorar a compactação do concreto, reduzindo a quantidade de vazios e aumentando a densidade do material. Isso é benéfico para a resistência e durabilidade do concreto. Além disso, uma distribuição granulométrica equilibrada pode contribuir para uma melhor interligação entre os grãos e a matriz cimentícia, aumentando a resistência mecânica do concreto. A granulometria adequada também pode influenciar positivamente a durabilidade do concreto, afetando a permeabilidade e a resistência a ciclos de congelamento e descongelamento, entre outros fatores.

A Tabela 5 corresponde à análise dos diâmetros médios do material passante para os percentis d20, d50 e d80 das amostras 1, 2, 3 e 4. Os resultados são respectivamente 0,27 mm, 1,65 mm e 8,3 mm.

Tabela 5 – Diâmetros médios das partículas das amostras 1, 2, 3 e 4 (mm).

diâmetro (mm)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	amostra 4
d20	0,27	0,29	0,26	0,26
	0,28		0,26	
	0,27			
d50	1,5	1,8	1,6	1,7
	1,65		1,65	
	1,65			
d80	5,8	10	8,2	9,2
	7,9		8,7	
	8,3			

Fonte: Autor

Resultados Do Ensaio A Úmido – Amostras 5 e 6

No contexto específico do resíduo de caulim duro, a condução de ensaios de classificação a úmido é justificada por diversos motivos, especialmente quando se consideram os resultados obtidos em ensaios a seco e observações por microscopia óptica, onde se verificou finos aderidos às partículas maiores devido às forças de coesão e adesão, dificultando a separação precisa durante o peneiramento a seco.

Ensaio a seco são comumente utilizados para determinar a granulometria de materiais. No entanto, em casos como o do caulim duro, esses ensaios podem não ser suficientes para obter uma caracterização completa. Os finos presentes no material podem aderir às partículas maiores, resultando em erros na medição e na interpretação da distribuição granulométrica. A presença de finos aderidos pode levar a erros significativos na medição da granulometria, afetando a precisão dos resultados. A classificação a úmido minimiza esses erros ao assegurar que todas as partículas são adequadamente separadas e classificadas de acordo com seu tamanho real.

Assim, as tabelas e gráficos a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios de classificação granulométrica a úmido das amostras 5 e 6 (Tabelas 6 e 7, respectivamente). Para a classificação da amostra 5, foi utilizado um conjunto de peneiras menores devido à

indisponibilidade das peneiras específicas durante a realização do ensaio. Assim, os dados de classificação da amostra 6 apresentam resultados mais completos.

A princípio, pode-se observar que o material que apresentavam uma grande concentração na peneira de 4,75 mm no ensaio da amostra 5 passa a ser distribuído entre as peneiras de aberturas maiores. Outro detalhe que merece atenção é o intervalo entre 0,04 mm e 0,05 mm na Figura 13, pois esta fração apresenta uma porcentagem consideravelmente menor em comparação com os resultados do ensaio a seco, o que indica que boa parte de material fino tende a permanecer retido na peneira de 0,04 mm para o método de peneiramento a seco.

Tabela 6: Dados do peneiramento da Amostra 5 (a úmido).

Abertura da malha (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
4,80	113,28	22,96	22,96	77,04
3,40	26,00	5,27	28,23	71,77
2,40	31,86	6,46	34,69	65,31
2,00	17,46	3,54	38,22	61,78
1,42	42,69	8,65	46,88	53,12
0,85	28,97	5,87	52,75	47,25
0,30	68,35	13,85	66,60	33,40
0,25	14,95	3,03	69,63	30,37
0,18	9,68	1,96	71,59	28,41
0,15	4,05	0,82	72,41	27,59
0,10	13,77	2,79	75,20	24,80
0,07	45,83	9,29	84,49	15,51
0,05	20,66	4,19	88,68	11,32
0,04	14,13	2,86	91,54	8,46
0,00	41,72	8,46	100,00	0,00
Total	493,40	100,00	-----	-----

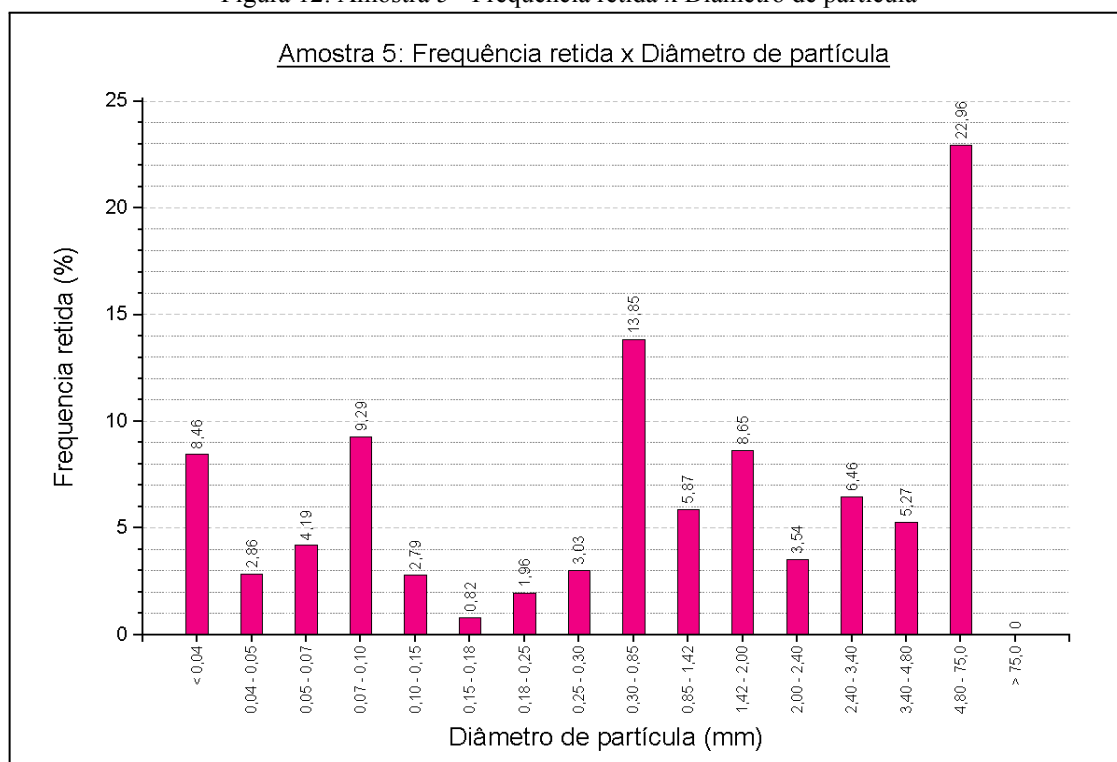
Fonte: Autor

Tabela 7: Dados do peneiramento da Amostra 6 (a úmido).

Abertura da malha (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
75,00	0,00	0,00	500,78	100,00
37,5	60,39	12,06	440,39	87,94
19,00	51,26	10,24	389,13	77,70
9,50	34,83	6,96	354,30	70,75
4,80	41,80	8,35	312,50	62,40
3,40	20,77	4,15	291,73	58,26
2,40	26,03	5,20	265,70	53,06
2,00	14,16	2,83	251,54	50,23
1,42	31,56	6,30	219,98	43,93
1,18	5,33	1,06	214,65	42,86
0,85	21,30	4,25	193,35	38,61
0,60	17,28	3,45	176,07	35,16
0,30	42,06	8,40	134,01	26,76
0,25	10,43	2,08	123,58	24,68
0,18	7,97	1,59	115,61	23,09
0,15	15,01	3,00	100,60	20,09
0,10	12,85	2,57	87,75	17,52
0,07	12,78	2,55	74,97	14,97
0,05	24,30	4,85	50,67	10,12
0,04	1,80	0,36	48,87	9,76
0,00	48,87	9,76	0,00	0,00
Total	500,78	100,00	-----	-----

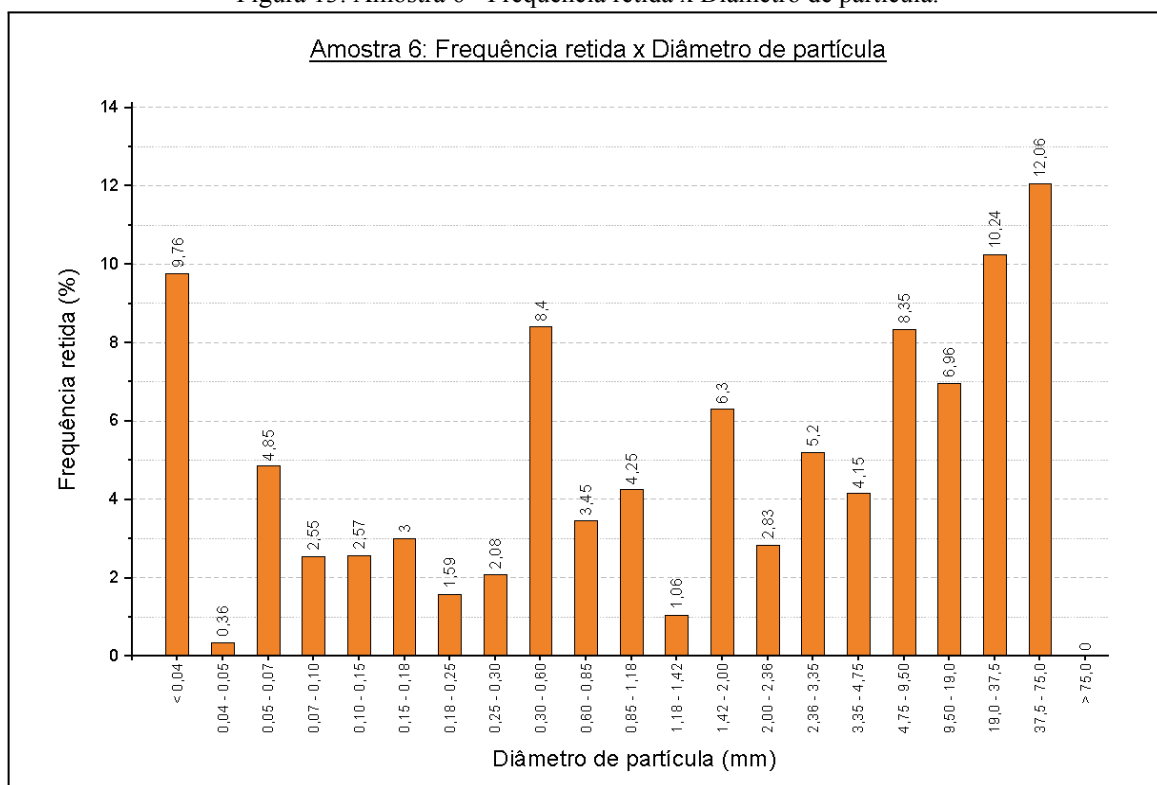
Fonte: Autor

Figura 12: Amostra 5 - Frequência retida x Diâmetro de partícula



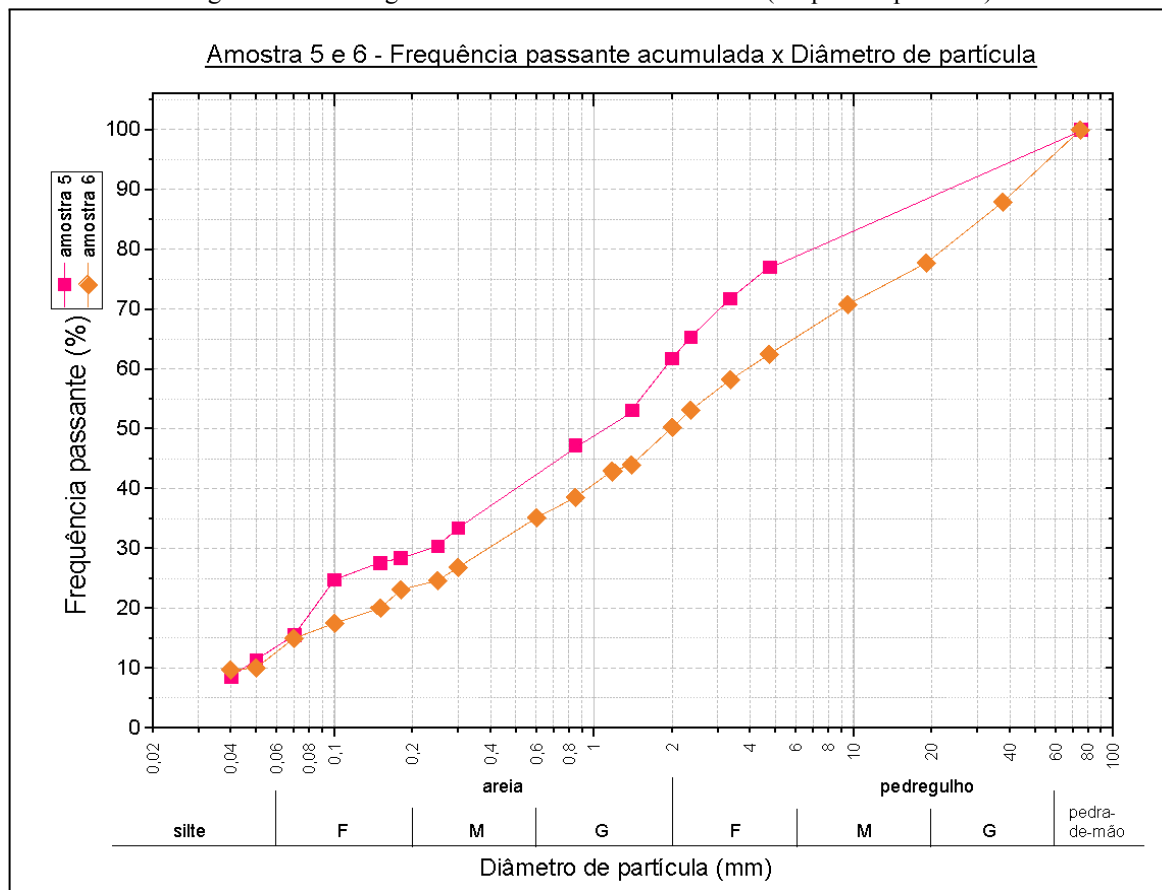
Fonte: Autor

Figura 13: Amostra 6 - Frequência retida x Diâmetro de partícula.



Fonte: Autor

Figura 14: Curvas granulométricas das amostras 5 e 6 (frequência passante).



Fonte: Autor

PUBLICAÇÕES:

Título: Caracterização do resíduo de caulim produzido em minerações do Pará e sua aplicação em cimento geopolimérico.

Autores: Queren Lira Nascimento, Vitor Leão Santana, Beatriz Corrêa Codri, Cláudia Furtado Santos, Gabriel Walfredo Souza, Maria Eduarda de Almeida Mendes.

Evento: XIV Congresso Norte - Nordeste de Pesquisa e Inovação

Local: Belém - PA

Data: 27 a 28 de Agosto de 2024.



SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Afim de complementar a caracterização do resíduo de caulim duro, além das análises granulométrica, MEV, EDS e microscopia óptica já realizadas, a implementação de outras atividades e análises podem ser desenvolvidas para obter uma caracterização mais abrangente e detalhada, conforme a disponibilidade de equipamentos especializados.

- Difração de Raios-X (DRX): A técnica é importante para identificar e quantificar as fases cristalinas presentes no caulim duro. A análise DRX pode fornecer informações detalhadas sobre a estrutura cristalina dos minerais, como a caulinita, e identificar impurezas como quartzo, feldspato e minerais de ferro.
- Fluorescência de Raios-X (FRX): A análise é utilizada para determinar a composição química elementar do caulim duro. Esta técnica é útil para quantificar os teores de elementos como alumínio, silício, ferro, titânio e traços de outros elementos.
- Análise Termogravimétrica (TG): A análise TG é importante para estudar as transformações térmicas do caulim duro. Essa técnica permite identificar as temperaturas de desidratação, decomposição e formação de novas fases, como metacaulinita e mulita.
- Análise de Massa Específica: A determinação da massa específica do caulim duro é interessante para entender suas propriedades físicas e sua densidade, fornecendo dados importantes para o controle de qualidade e aplicações industriais.
- Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos: A preparação de corpos de prova para realização de ensaios mecânicos, como resistência à compressão, flexão e tração fornecem informações sobre a resistência mecânica e a durabilidade do cimento geopolimérico a partir do caulim duro, sendo essenciais para avaliar sua aplicabilidade em diferentes setores industriais.

Essas análises adicionais podem fornecer uma caracterização mais completa e detalhada do caulim duro, permitindo uma melhor compreensão de suas propriedades e potenciais aplicações industriais.

CONCLUSÃO

A caracterização mineralógica do rejeito de caulim duro proveniente da mineração na região do Rio Capim (Ipixuna do Pará/PA) revela resultados relevantes para sua aplicação na produção de pastas e argamassas baseadas em geopolímeros. A análise granulométrica indicou a predominância de frações graúdas associadas a partículas finas. A microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que os grãos de caulim duro possuem uma boa distribuição granulométrica, com cristalitos com morfologia pseudo-hexagonal.

Também pode-se concluir a partir da morfologia das partículas de caulim que o mesmo sofreu considerável intemperismo, uma vez que o baixo grau de cristalização indica que o mesmo estaria passando por processo de alteração, evidenciada pela presença de fases amorfas, comumente chamadas de “gel”. A análise EDS confirmou que o caulim duro é composto principalmente por silício e alumínio, elementos essenciais para a reatividade em processos de geopolimerização. A presença de pequenas quantidades de ferro e titânio também foi observada, o que é consistente com a composição química típica do caulim.

Os ensaios de classificação granulométrica, tanto a seco quanto a úmido, forneceram uma visão detalhada da distribuição de tamanho de partícula, destacando a importância de métodos adequados para minimizar erros na medição e interpretação dos dados. A condução de ensaios a úmido foi particularmente eficaz para separar finos aderidos às partículas maiores, garantindo uma caracterização mais precisa.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o rejeito de caulim duro possui características adequadas para a produção de geopolímeros, contribuindo para a sustentabilidade ao possibilitar o reaproveitamento de resíduos minerais. A implementação de análises adicionais, como Difração de Raios-X (DRX), Fluorescência de Raios-X (FRX), Análise Termogravimétrica (TG) e ensaios mecânicos, pode complementar a caracterização e fornecer uma compreensão ainda mais abrangente das propriedades e aplicações do caulim duro.

Este estudo não apenas contribui para o melhor entendimento das propriedades do rejeito de caulim da mineração desenvolvida na região do Rio Capim, mas também para a aplicação diversificada do material que possui um grande potencial na composição de cimento de base geopolimérica, o que promove a sustentabilidade na indústria mineral, otimizando a exploração das jazidas na região e reduzindo o impacto ambiental.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 248:2001: Agregados - Determinação da Composição Granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 26:2000: Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 27:2000: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 6502/1995: Rochas e solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 66:1996: Agregados - Constituintes mineralógicos dos agregados naturais - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BALAGURU, P. N., LYON, R. E., HAMMEL, J. A., “**Strength retention of fire resistant aluminosilicate-carbon composites under wet-dry conditions**”, *Composites engineering*, 3, 107-111, 2000.

BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos caulínicos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

CAMPOS, A. P.; MONTEIRO, C. C.; SILVA, J. P. A. **Caulim**. In: **Sumário Mineral Brasileiro 2018**. Brasília: ANM, 2018.

CARNEIRO, B. S.; ANGÉLICA, R. S.; SCHELLER, T.; DE CASTRO, E. A. S.; NEVES, R. F. Neves. **Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará**. *Cerâmica*, v. 49, n. 312, p. 237-244, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/GGh5Pr5KcZtPPTxtL9vJXRq/>>

CHERATA, I. D. **Caracterização da caulinita da região do Rio Capim, Pará**. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

DAVIDOVITS, J., “**Mineral Polymers and Methods of making Them**”, U.S. Patent 4.349.386, 1982.

DAVIDOVITS, J., “**30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications, Market Trends and Potential Breakthroughs**”, Keynote Conference on Geopolymer Conference 2002, Melbourne, Australia, 2002.

DA LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; DE CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L.; SCORZELLI, R. B. Argila – Caulim. cap. 12. in: DA LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 2. ed. CETEM-MCT. Rio de Janeiro, 2008.

FILHO, E. dos S. **Caracterização de caulim da região do Rio Capim (PA)**. Dissertação (Mestrado em Física), Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Rio de Janeiro, 2010.

DE SOUSA, D. J. L. **Étude pétrologique et cristalochimique du kaolin de la rivière Capim-Pará, Brésil**. Tese de Doutorado. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; NETO, A. A. Caracterização tecnológica de minérios. cap. 3. in: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; DE ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. 4. ed. CETEM. Rio de Janeiro, 2004.

PROVIS, J. L., **“Modelling the formation of geopolymers”**, Doctor of Philosophy, Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, 2006.

SILVA, F. J., **“Reforço e Fratura em Compósitos de Matriz Álcali-ativada”**, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia (IME) – Rio de Janeiro, 2000.

SILVA, A. C. R., **“Concreto geopolimérico para pavimento: uma alternativa ecológica para a indústria do cimento”**, Seminário sobre a indústria e o meio ambiente, Instituto Militar de Engenharia, <http://transportes.ime.eb.br> Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, A. C. R., **“COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS COM FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO”**, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia (IME) – Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, L. G., **“Geopolímeros à base de resíduos industriais”**, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia (IME) , Brasil, 2005.