

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Robson Rodrigues Amaro

EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE DISPERSANTES NA EFICIÊNCIA DA MOAGEM

BELO HORIZONTE
2023

Robson Rodrigues Amaro

EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE DISPERSANTES NA EFICIÊNCIA DA MOAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Linha de Pesquisa: Tratamento de minério

Orientador: Prof. Dr. Roberto Galéry

BELO HORIZONTE
2023

A485e

Amaro, Robson Rodrigues.

Efeitos da utilização de dispersantes na eficiência da moagem
[recurso eletrônico] / Robson Rodrigues Amaro. – 2023.
1 recurso online (87 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Galery.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f. 62-87.

Bibliografia: f. 51-61.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Moagem - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. 5. Beneficiamento de
minério - Teses. I. Galery, Roberto. II. Universidade Federal de Minas
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165


Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG




UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas




A dissertação intitulada "**Efeitos da Utilização de Dispersantes na Eficiência da Moagem**", área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pelo candidato **Robson Rodrigues Amaro**, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, foi aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO GALÉRY**
Data: 26/11/2024 11:45:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Roberto Galéry Orientador (UFMG)

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO**
Data: 26/11/2024 13:28:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro (UFMG)

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS**
Data: 26/11/2024 12:23:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Leonardo Júnior Fernandes Campos (UFMG)

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO HENRIQUE MARTINS NUNES**
Data: 03/12/2024 18:15:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 22 de dezembro de 2023

Dedico este projeto a todos os professores que me influenciaram na minha trajetória. Em especial o professor Roberto Galéry, meu orientador, com quem compartilhei minhas dúvidas e angústias a respeito do tema.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte da minha vida, por me dar saúde, força e fé para seguir em frente e concretizar esta vitória!

Agradeço aos meus pais pelo amor e dedicação. O apoio de vocês foi fundamental para que eu chegasse até aqui. Pelo exemplo de pessoas que, certamente, influenciou na minha formação pessoal, e de profissionalismo, garra e determinação, dos quais tanto me orgulho.

Aos meus amigos, pelo incentivo e carinho ao longo desta trajetória em especial ao Athos, Guilherme e a Bruna, muito obrigado por todo apoio.

Agradeço, também, em especial ao meu orientador o professor Roberto Galéry, pela oportunidade que me foi ofertada, pela paciência, dedicação e conhecimentos compartilhados.

À toda equipe laboratório de tratamento de minério da UFMG e ao Prof. Luiz Claudio e o Alberto. Meu muito obrigado a cada um pelas dicas, sugestões, pelas conversas e por toda consideração.

À todos os colaboradores da Vale que me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho em especial ao Me. Elismar Miquelanti, Me. Geraldo Lisboa e a toda minha equipe o Eng. Samuel, Eng. Ronan, Eng Rosemberg e o Eng. Vinicius, muito obrigado pelo apoio e conhecimento compartilhados.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”
Henry Ford

RESUMO

Nos processos de beneficiamento mineral, a etapa de moagem consome a maior quantidade de energia entre todas as operações, uma vez que a redução no tamanho das partículas de minério é essencial para a liberação das partículas que passarão pelo processo de concentração do minério. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da fragmentação no processo de moagem de minério de ferro na presença de seis reagentes dispersantes. As análises granulométricas de cada produto de fragmentação na presença e ausência de dispersantes foram avaliadas de forma comparativa. Os resultados demonstraram que a ação dos dispersantes é eficaz, apresentando reduções granulométricas mais pronunciadas na presença desses reagentes. Comparando o material que passou pela malha de 38 μm , observou-se que 18,40% passaram na presença de dispersantes, em contraste com 1,35% na ausência deles. O estudo destacou a importância desses reagentes na eficiência do processo de moagem, podendo contribuir significativamente para a redução dos custos operacionais com a energia aplicada no processo de beneficiamento do minério de ferro. Uma atenção especial deve ser dada à aplicação desses reagentes para uso industrial no beneficiamento do minério de ferro.

Palavras-chave: beneficiamento; moagem; minério; dispersantes; eficiência.

ABSTRACT

In mineral beneficiation processes, the grinding stage consumes the most energy among all operations, as the reduction in the size of the ore particle is essential for the liberation of particles which will undergo the ore concentration process. This study aimed to evaluate the efficiency of fragmentation in the grinding process of an iron ore in the presence of six dispersant reagents. Granulometric analyses of each fragmentation product in the presence and absence of dispersants were comparatively evaluated. The results demonstrated that the dispersant action is effective, showing more pronounced granulometric reductions in the presence of these reagents. Comparing the material passing through the 0.38 μm mesh, 18.40% passers were observed in the presence of dispersants against 1.35% passers in their absence. The study highlighted the importance of these reagents in the grinding process efficiency, potentially contributing significantly to reducing operational costs with the energy applied in the iron ore beneficiation process. A special attention should be given to the application of these reagents for industrial use in iron ore beneficiation.

Keywords: beneficiation; grinding; ore; dispersants; efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Minério de cabeça de itabirito.	33
Figura 2 – Quarteadores tipo Jones.....	34
Figura 3 - Fotomicrografias da amostra AM 01-CA	37
Figura 4 - Fotomicrografias da amostra AM 02-CA.	37
Figura 5 - Quantificação mineralógica das amostras AM 01-CA e AM 02-CA.	38
Figura 6 – Curva de passante acumulado (%).	40
Figura 7 - Comparativo geral das curvas granulométricas.	42
Figura 8 - Comparativo das curvas granulométricas do reagente Solutrix 100 com o teste sem reagente.	44
Figura 9 - Comparativo das curvas granulométricas do reagente Solutrix D com o teste sem reagente.	44
Figura 10 - Comparativo das curvas granulométricas do reagente Solutrix A40 com o teste sem reagente.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dispersantes inorgânicos	30
Tabela 2 - Controle de processo da mina de Cauê – Hematita (% passante acumulado)	35
Tabela 3 - Reagentes testados como aditivos de moagem	36
Tabela 4 - Quantificação mineralógica (%).	39
Tabela 5 - Distribuição química por mineral (%).	39
Tabela 6 – Percentual de passante acumulado para a malha de 150 mm.	40
Tabela 7 - Modelagem da análise granulométrica.....	41
Tabela 8 - Teste de peneiramento na malha recomendada de 150 e 38 μ m.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS

Fe – Ferro.

E – Energia consumida (kWh/ton).

Wi – Índice de trabalho de Bond (kWh/ton).

P₈₀ – Tamanho das partículas produzidas (80% passante) no produto final (µm).

F₈₀ – Tamanho das partículas alimentadas (80% passante) no material de alimentação (µm).

DEM – Simulação por Elementos Discretos.

CDF – Simulação por Dinâmica dos Fluidos Computacional.

Re – Número de Reynolds.

ρ – Densidade do fluido.

u – Velocidade da partícula relativa ao fluido.

d – Diâmetro característico da partícula.

μ – Viscosidade dinâmica do fluido.

MO – Microscopia Óptica de Luz Refletida.

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura.

HE – Hematita especular.

HL – Hematita lamelar.

HG – Hematita granular.

HS – Hematita sinuosa.

HC – Hematita compacta.

GMac – Goethita maciça.

GO – Goethita.

QL – Quartzo livre.

QM – Quartzo misto.

QZ – Quartzo.

MN – Óxido de manganês.

CA – Caulinita.

OT – Outros minerais.

OF – Over flow.

UF – Under flow.

Desl – Deslapagem.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo geral.....	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1. Mineração	17
3.2. Cominuição	19
3.3. Concentração e classificação do minério.....	22
3.4. Separação sólido-líquido.....	24
3.5. Reologia da moagem	24
3.6. Interação hidrodinâmica da polpa	25
3.7. Forças entre as partículas.....	27
3.8. Difusão browniana	28
3.9. Utilização de dispersantes na moagem do minério.....	29
3.10. Mecanismo de ação e tipos de dispersantes	30
3.10.1.1. Dispersantes inorgânicos	30
3.10.1.2. Dispersantes poliméricos	31
3.10.3. Avaliação da efetividade de dispersantes na moagem	32
4. METODOLOGIA	33
4.1. Amostragem.....	33
4.2. Quarteamento amostral	33
4.3. Caracterização mineralógica.....	34
4.4. Teste de peneiramento	34
4.5. Reagentes.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Análise mineralógica e química	37
5.2. Análise granulométrica.....	39
6. CONCLUSÃO	48
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50
ANEXO 1	61
ANEXO 2	64

1. INTRODUÇÃO

Mineração é uma atividade fundamental para a sociedade e a economia global, fornecendo recursos minerais essenciais para diversos setores (DA SILVA, 2023). Dentre as inúmeras etapas que fazem parte da atividade mineradora, a moagem desempenha um papel central na preparação de minérios para a extração de seus componentes de interesse (DA CUNHA JUNIOR et al., 2022). O estudo do comportamento do fluxo e deformação da polpa de minério durante esse processo, conhecido como reologia da moagem, é um aspecto crítico com influência direta na eficiência e produtividade das operações de mineração. Um dos principais desafios na reologia da moagem é o controle da viscosidade, densidade, concentração de sólidos e distribuição granulométrica da polpa (FERRAZZO et al., 2019). A busca por uma reologia adequada visa otimizar a eficiência da moagem, minimizando o consumo de energia durante essa etapa, considerando a necessidade da aplicação de forças mecânicas das máquinas que compõem o esmagamento e a moagem para a cominuição do minério (ROQUE et al., 2022).

O consumo de energia no processo de reologia da moagem do minério é um fator de grande importância, representando uma parte significativa dos custos operacionais devido ao uso intensivo de energia na moagem (GUERRA; TREVISAN, 2020). A viscosidade da polpa, por exemplo, influencia a capacidade de transporte do minério por tubos e bombas, assim como a capacidade de separação mineral em estágios subsequentes (DE MORAIS et al., 2021). Assim, quanto maior a viscosidade da polpa, maior sua resistência ao fluxo, exigindo conseqüentemente mais energia para o movimento do material, demandando uma força mecânica maior dos moinhos e equipamentos utilizados no processo, bem como materiais com alta dureza, concentrações sólidas elevadas e resistência (DA SILVA et al., 2021).

Para reduzir o consumo de energia na moagem, a indústria de mineração busca constantemente investir em novas tecnologias para tornar esse processo mais eficiente e sustentável (DA SILVA; DE AZEVEDO, 2021). Avanços nesse campo incluem otimização do tamanho de partículas, integração com fontes de energia renovável e o uso de dispersantes e modificadores reológicos, que são aditivos que melhoram as propriedades físico-químicas das polpas, facilitando o fluxo de transporte (OLIVEIRA et al., 2023). Nesse contexto, os dispersantes atuam reduzindo as forças atrativas entre partículas, impedindo a formação de aglomerados e,

consequentemente, melhorando a fluidez da polpa, resultando em uma moagem mais eficiente com menor consumo de energia e maior recuperação de minerais valiosos presentes no minério (DE CASTRO et al., 2011).

Apesar de oferecerem diversos benefícios em termos de potenciais economias de energia para o processo minerador, os dispersantes reológicos têm algumas limitações e desafios no campo, como a necessidade de selecionar um dispersante adequado ao tipo de mineral, considerando que cada um requer um aditivo específico (ROCHA et al., 2019). Além disso, são necessários estudos recorrentes sobre a adequação da dosagem a ser utilizada, pois a inadequação pode levar a problemas de sedimentação, representando um risco ambiental, especialmente porque alguns dispersantes podem ser tóxicos ao meio ambiente, exigindo um uso e descarte adequados e conscientes (BRITO, 2006).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo principal avaliar o impacto do uso de dispersantes na otimização da moagem da hematita da Mina de Cauê da Vale S.A. por meio de testes de peneiramento com e sem dispersantes, caracterização mineralogicamente e aplicabilidade de modelagens matemáticas para definir o tempo e a granulometria ideais para a moagem, que por sua vez visaram aprofundar o entendimento sobre a influência dos dispersantes, contribuindo para a eficiência do processo e fornecendo dados relevantes para a indústria mineradora.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito da utilização de dispersantes na otimização do processo de moagem da hematita provinda da Mina de Cauê da mineradora Vale S. A..

2.2. Objetivos específicos

- Realizar análise granulométrica com e sem a adição de dispersantes;
- Realizar a caracterização mineralógica da hematita;
- Avaliar a constituição química do mineral;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Mineração

O minério é uma fonte de extrema relevância no contexto global, uma vez que impulsiona diversos setores industriais, além do comércio internacional e, por conseguinte, o crescimento econômico de muitas nações (SPITZ; TRUDINGER, 2019). Os recursos minerais, provenientes de depósitos naturais na crosta terrestre, constituem um agregado de substâncias minerais e químicas, cuja formação se dá por complexos processos geológicos (LOPES et al., 2015).

Certos minérios podem possuir caráter metálico, como o minério de ferro, que se destaca como um componente essencial em diversas indústrias, como por exemplo na produção de aço, que se fundamenta a partir da exploração do ferro, sendo um pilar na construção civil, na fabricação de veículos e na infraestrutura (EVANS, 2009). Além do aspecto metálico, minérios como o carvão, gesso e sal, possuem propriedades não-metálicas, e também desempenham papéis importantes nas indústrias, a exemplo disso tem-se o carvão, que é essencial na geração de energia, o gesso que é utilizado na construção civil e o sal tem aplicações variadas, desde a indústria alimentícia até a produção química (GÖTZE; GÖBBELS, 2023).

A exportação e o comércio desses minérios representam uma fonte substancial de receita para muitos países, moldando suas balanças comerciais e impactando diretamente a estabilidade econômica. As nações dotadas de ricas reservas minerais frequentemente se destacam como importantes agentes econômicos no cenário global, com suas operações de mineração contribuindo para a geração de empregos, investimentos e desenvolvimento infraestrutural (RENNER; WELLMER, 2020).

Na indústria brasileira, o ferro (Fe) é um dos principais elementos utilizados, tendo como fonte de obtenção a exploração mineral. A substância corresponde ao quarto elemento com maior abundância na crosta terrestre e seu mineral de partida pode ser classificado de acordo com a sua composição metálica que frequentemente apresenta-se como óxidos, como no caso da Magnetita (Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3) e Pirita (FeS_2) (LIMA; ABREU, 2018). Além da composição química, considerando o tratamento metalúrgico, o minério de ferro pode ser dividido de acordo com a sua granulometria, podendo ser granulado, que compreende a faixa de 200 mm a 12,5 mm, minérios férricos finos para sinter, na faixa granulométrica de 6,3 a 0,15 mm, e os *pellet feed*, com espessuras inferiores a 0,15 mm (BAUTISTA et al., 2014).

Para chegar ao produto final, no qual está agregado seu valor econômico, o minério passa por diversos processos onde é adotado um conjunto de ações que possuem a finalidade de extrair o material da natureza, sendo o processo denominado de mineração, subdividindo-se nas etapas de prospecção, exploração, extração e beneficiamento mineral (DE MORAIS et al., 2021).

A prospecção e exploração, são as fases iniciais de toda e qualquer atividade mineradora (DA SILVA; DE AZEVEDO, 2021). Na prospecção é realizado a busca e a identificação de áreas com indícios de concentração de minerais de interesse econômico, enquanto a exploração analisa de maneira mais detalhada as áreas identificadas, quantificando volumes, qualidades e a extensão dos depósitos naturais (VERSIANI; SUZIGAN, 1990). A etapa seguinte representa o procedimento de extração do minério de seus depósitos naturais, podendo ocorrer de diversas maneiras a depender da geologia e da localização do depósito (SCARPELLI; HORIKAVA, 2017). De maneira geral, é possível verificar dois principais sistemas de extração, podendo ser a céu aberto quando o material está próximo a superfície, ou a extração subterrânea, que é utilizada quando o minério está mais profundo no depósito (MOREIRA, MOREIRA, 2004).

O terceiro e último estágio corresponde a etapa de beneficiamento mineral, que por sua vez engloba uma série de etapas essenciais para a transformação de minérios brutos em produtos com valor econômico. Nesse processo, uma variedade de métodos é empregada para obtenção do material final. Esses métodos são aplicados com o objetivo de extrair e processar os minerais, culminando na obtenção dos metais desejados (RAHMONOV; CABALA; KRZYSZTOFIK, 2021).

As práticas associadas a essa fase incluem a preparação inicial do minério através de técnicas como cominuição, classificação, concentração, aglomeração e o processo de separação sólido-líquido (STELA; DUARTE; PEREIRA, 2020). Esses procedimentos não apenas visam otimizar a pureza e a qualidade do metal extraído, mas também desempenham um papel crucial na eficiência geral do processo metalúrgico. Portanto, a lavagem do minério, como parte integrante do ciclo de mineração, desempenha uma função vital na consecução dos objetivos metalúrgicos estabelecidos.

3.2. Cominuição

O minério é uma composição de minerais caracterizada por uma alta concentração de minerais específicos ou elementos químicos, em contrapartida a cominuição refere-se à aplicação de métodos específicos destinados a reduzir o tamanho desse material. Esse processo tem início com a britagem, uma etapa que visa a quebra de grandes blocos de minério em tamanhos desejados, facilitando assim o manuseio do material. (WELLENKAP, 1999)

Após a britagem é realizado a moagem do minério, que reduz ainda mais o material já processado em massas granulométricas extremamente finas (ROVERI; CHAVES, 2011). A eficiência da britagem depende do tipo de britador utilizado e da configuração do circuito, sendo comum o emprego de britadores de mandíbula, cone ou de impacto. A utilização de cada categoria de britador depende especificamente do tipo de material de partida e do momento específico da moagem (DE CARVALHO, 2012). Como por exemplo, ROVERI e CHAVES (2011), que indicam a utilização do britador do tipo mandíbula na etapa inicial do processo de moagem, uma vez que este possui a capacidade e a potência apropriada para triturar minérios com elevado grau de dureza e abrasividade, como no caso do minério bruto.

A cominuição do minério baseia-se em modelagens matemáticas e simulações computacionais que visam otimizar os circuitos, permitindo a previsão do desempenho do processo e a identificação de possíveis melhorias (LANARO; BÖHME, 2021). Uma teoria aplicável à determinação da modelagem da cominuição é a Lei de Bond, que estabelece uma relação matemática entre a energia consumida no processo de fragmentação do minério e o tamanho final desejado. Esta lei é útil para determinar o intervalo granulométrico característico da moagem (LIMA; DA SILVA FILHO, 2021), sendo essencial compreender esse intervalo para otimizar as operações em termos de eficiência e economia de recursos.

A Lei de Bond é expressa pela Equação 1, indicando que a cominuição é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho das partículas finais. Em outras palavras, a energia necessária para reduzir o tamanho das partículas aumenta à medida que estas se tornam menores (ANDRADE; MENEZES; ATHAYDE, 2014). Esta compreensão é crucial para o refinamento das operações de cominuição, permitindo uma abordagem mais eficaz na gestão de recursos e no aumento da eficiência do processo. Confirmar as informações com as fontes citadas, como

LANARO; BÖHME (2021) e LIMA; DA SILVA FILHO (2021), é recomendado para garantir a precisão das informações apresentadas.

$$E = \frac{10}{\sqrt{Wi}} (\sqrt{P_{80}} - \sqrt{F_{80}}) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E = energia consumida (kWh/ton);

Wi = índice de trabalho de Bond (kWh/ton);

P_{80} = tamanho das partículas produzidas (80% passante) no produto final (μm);

F_{80} = tamanho das partículas alimentadas (80% passante) no material de alimentação (μm).

Muito embora a Lei de Bond seja uma excelente ferramenta para otimizar o processo de cominuição, a modelagem possui algumas limitações, como o fato de basear-se em pressuposições simplificadas sobre o comportamento dos materiais, podendo assim não refletir precisamente as condições reais em uma operação de mineração. Além disso, o modelo matemático pode apresentar variações no índice de trabalho alterando a energia consumida, ou ainda, não considerando fatores como atrito e aglomeração de minerais de partículas extremamente finas (DE CARVALHO, 2012).

A Equação de Kick (equação 2), assim como a Lei de Bond, é uma ferramenta essencial na compreensão dos processos de cominuição, estabelecendo uma relação entre a energia consumida na fase inicial e final da fragmentação das partículas. Notavelmente, a Equação de Kick é aplicada exclusivamente a processos que ocorrem em moinhos de bolas, onde os mecanismos de fragmentação predominam (NONATO; DE ABREU, 2020).

O contexto particular dos moinhos de bolas é crucial para a aplicação da Equação de Kick. Nestes, as partículas são submetidas a colisões com as bolas presentes no moinho. Essas colisões resultam em uma energia de consumo diretamente relacionada à taxa de colisões entre as bolas e as partículas. A abordagem teórica subjacente à Equação de Kick permite uma compreensão mais aprofundada dos fatores que influenciam a eficiência do processo de cominuição nesse cenário específico (CLEARY; MORRISON, 2016).

$$E = K \ln \left(\frac{L_i}{L_f} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

L_i = diâmetro médio da matéria-prima;

L_f = diâmetro médio do produto;

E = consumo energético do moinho;
 K = constante de proporcionalidade.

Vale ressaltar que a constante de proporcionalidade é igual a $k = K_k \times f_c$, onde K_k corresponde à constante de Kick e f_c é igual a resistência da substância à trituração.

Essa equação destaca a relação inversamente proporcional entre a energia consumida e o tamanho médio das partículas resultantes. Em outras palavras, à medida que o tamanho das partículas diminui, a energia necessária para sua cominuição aumenta, refletindo a influência direta das colisões entre as bolas e as partículas no processo de moagem em moinhos de bolas (NUNES; UAGODA, 2020).

Por sua vez, uma terceira lei empregada em processos de cominuição é a lei de Rittinger. Sua aplicação se concentra de maneira mais específica na análise da energia demandada para a realização da cominuição, estabelecendo uma relação proporcional com a nova superfície que surge durante esse procedimento, conforme expresso pela equação 3. Essa equação, que se destaca como uma ferramenta crucial na compreensão desses fenômenos, revela a dependência direta entre a energia envolvida e a extensão da superfície gerada no decorrer do processo (GOOSSENS; RIBEIRO; MOURA, 2013).

$$E = K \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

E = energia consumida na cominuição;

K = Constante de proporcionalidade;

D_1 = diâmetro inicial das partículas;

D_2 = diâmetro final das partículas.

Além das Lei de Bond, de Kick e de Rittinger, existem outras ferramentas matemáticas e teóricas que fornecem uma base sólida para a predição do comportamento de minerais durante as etapas de britagem e moagem, como por exemplo o Modelo Balanço Populacional, propondo que em um processo de cominuição ocorre um equilíbrio entre a taxa de produção de novas partículas e a de eliminação de partículas já existentes, entregando uma abordagem para analisar e prever a distribuição de tamanhos de partículas ao longo do processo de cominuição (ZUNIGA et al., 2011).

Outras teorias, modelos matemáticos e técnicas computacionais, como a Simulação por Elementos Discretos (DEM) e Simulação por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), são aplicados para entender e otimizar a cominuição, visando

maximizar a eficiência do processo e contribuindo para operações de mineração mais eficientes e sustentáveis (NAVARRO et al., 2020).

3.3. Concentração e classificação do minério

O processo de beneficiamento do minério segue pela separação dos minerais de valor da ganga, ou seja, materiais que não são alvos principais da extração. Essa separação é realizada na etapa de concentração do minério, onde é proporcionada a redução da quantidade de material que precisará ser processado (ACCOSTUPA; CCAMA, 2022).

A flotação é a principal técnica adotada na indústria de mineração, sendo difundida devido a sua capacidade de promover uma separação seletiva e eficiente. O processo de flotação envolve procedimentos coordenados de preparação da polpa mineral, partindo da adição de reagentes químicos que são introduzidos na suspensão do minério com o intuito de homogeneizar a pilha a ser concentrada, uma vez que certos minerais possuem caráter hidrofóbicos, ou seja tendem a repelir a água. Em contrapartida, alguns minerais permanecem sendo hidrofílicos, mantendo uma afinidade com o meio aquoso (BELTRÁN et al., 2023).

A diferenciação das propriedades de molhabilidade é a principal razão pela qual se opta para utiliza a técnica de flotação, considerando que a diferença de afinidade que os minerais apresentam com as partículas de água proporciona a ocorrência da formação de bolhas de ar microscópicas na polpa mineral, proporcionando a aderência dessas às partículas hidrofóbicas elevando-as à superfície da célula de flotação (GOMES et al., 2018). A flotação dos minerais de interesse para a camada superior corresponde a etapa determinante da separação efetiva da ganga mineral, considerando que enquanto os minerais hidrofóbicos sobrenadam e são coletados como concentrado, a ganga que é composta principalmente de minerais hidrofílicos, permanece precipitada na célula (LIMA; ABREU, 2018).

Quando objetiva-se concentrar minerais com propriedades polarizáveis utiliza-se a técnica de separação magnética, na qual o minério é exposto a um campo eletromagnético visando-se separar os minerais magnéticos dos não-magnéticos (MENDES et al., 2021). Outras metodologias de concentração, como a lixiviação, que corresponde a uma técnica metalúrgica, porém pode ser empregada no processo minerário, são empregadas quando se tem minerais como o ouro, onde o metal é dissolvido e posteriormente recuperado por métodos de extração (MASSIGNAN;

SÁNCHEZ, 2022). Por fim, o método de separação gravítica, baseia-se nos fundamentos físicos das diferenças entre as densidades dos minerais, podendo ser realizado em mesas concentradoras, que exploram os princípios dos movimentos oscilatórios em jiques que introduzem pulsão de água na polpa mineral e em espirais que capitalizam a força centrífuga e a gravidade para realizar a concentração dos minerais de interesse (VIANA et al., 2004).

Após o minério ser moído e concentrado, ele é transformado em aglomerados através dos procedimentos de sinterização e pelotização, esses processos condizem com o estágio de aglomeração (NASCIMENTO et al., 2022) Quando se utiliza a técnica de sinterização, reduz-se o minério em partículas finamente moídas, sendo posteriormente combinadas com outros componentes, como por exemplo o calcário, para a transformação da “carga de sínter” (CHAVEZ; OLIVEIRA, 2020). Por sua vez, quando empregado a pelotização, os minerais são transformados em pelotas com o auxílio de água ou outros aditivos químicos tornando-se capazes de suportar os processos subsequentes (FARIA 2022). A aglomeração facilita o manuseio, transporte e carregamento do material. Em seguida o material é levado a fundição, onde os materiais obtidos no procedimento de aglomeração, são transformados em metal bruto líquido através da aplicação de calor em altos-fornos, ocorrendo a separação do metal da ganga sobressalente e de outros componentes (MOREIRA; MOREIRA, 2004).

Após a etapa de concentração, inicia-se o processo de classificação mineral, cujo objetivo é segmentar as partículas com base em características como tamanho, densidade e composição mineral. A utilização de equipamentos especializados, como peneiras, ciclones e classificadores espirais, possibilita direcionar com precisão as partículas, otimizando o aproveitamento dos minerais desejados. Essa etapa desempenha um papel crucial na eficácia operacional do beneficiamento, permitindo a separação das frações mais valiosas do minério e encaminhando-as para processos subsequentes. Além disso, a classificação exerce uma função essencial na preparação do material, garantindo que cada fração seja tratada conforme suas propriedades específicas. Essa abordagem refinada é essencial para maximizar o rendimento dos minerais de interesse e minimizar o processamento de materiais indesejados, promovendo eficiência e sustentabilidade no ciclo de beneficiamento de minérios.

3.4. Separação sólido-líquido

Por fim, o estágio final do processo de beneficiamento mineral corresponde ao processo de separação sólido-líquido que visa a segregação das partículas sólidas dos componentes líquidos na polpa resultante das fases anteriores do beneficiamento mineral (KINNARINEN et al., 2016). Essa etapa é fundamental para a obtenção de um concentrado mais puro, eliminando a presença de água e outros líquidos indesejados, o que, por sua vez, aprimora substancialmente a qualidade do produto final (TARLETON; WAKEMAN, 2006).

A efetivação da separação sólido-líquido durante o beneficiamento de minério abrange uma diversidade de métodos, cada qual explorando distintos princípios físicos para atingir o objetivo desejado (NGUYEN et al., 2021). A sedimentação, como exemplo, fundamenta-se na disparidade de densidade entre as partículas sólidas e o líquido, permitindo que as partículas sólidas se depositem no fundo, enquanto o líquido é cuidadosamente removido da parte superior (BERNHARDT, 2012). Em contrapartida, a filtração se vale de materiais porosos que retêm as partículas sólidas, possibilitando que apenas o líquido transponha o meio filtrante (WAKEMAN, 2007). Outra abordagem é a centrifugação, que faz uso da força centrífuga para efetuar a separação, direcionando as partículas mais densas para fora do líquido (PEREIRA; COSTA, 2020). Cada uma dessas técnicas desempenha um papel crucial na obtenção de um concentrado mais puro, proporcionando uma escolha flexível e adaptável às características específicas do minério em processamento.

O objetivo principal desse processo é alcançar um concentrado de minério mais limpo, com reduzido teor de líquidos. Essa pureza aprimorada não apenas eleva a qualidade do produto final, mas também facilita as fases subsequentes do beneficiamento, como a secagem e o transporte (MAEDA, 2014). A remoção eficaz da água ou de outros líquidos indesejados contribui para aumentar a concentração dos minerais de valor, impactando positivamente na eficiência global do processo e, conseqüentemente, na viabilidade econômica da operação mineradora (FRANZ, 2008).

3.5. Reologia da moagem

À medida que as partículas diminuem de tamanho, o processo de tratamento do minério torna-se mais adverso. Isso ocorre porque a redução do tamanho implica

em uma necessidade maior de aplicação de forças mecânicas, as quais tendem a ter um efeito menos pronunciado sobre o minério. O fato ressalta a importância das forças relacionadas aos fenômenos físico-químicos que atuam nas partículas suspensas na polpa, como o efeito eletrostático e a viscosidade (SILVA et al., 2015). Nesse contexto à reologia se fundamenta na compreensão da deformação e do comportamento de escoamento de materiais minerais quando submetidos à aplicação de forças mecânicas (ROSIÈRE; BRAGAGNOLLO; KORF, 2019).

A reologia expressa os padrões de resposta que diferentes materiais minerais demonstram diante do estresse que são submetidos. Além disso, deve-se levar em consideração que cada mineral possui característica reológica distinta, evidenciando comportamentos específicos diante de forças externas (GUIMARÃES; SOUZA, 2018).

As respostas reológicas são um reflexo direto da heterogeneidade característica dos materiais minerais e das diversas condições a que estão sujeitas em ambientes de mineração (MANZANO et al., 2021). A heterogeneidade se estende por um conjunto de características, desde a granulometria e morfologia das partículas, até as interações superficiais entre elas. Ademais, fatores externos, como pressão, temperatura e concentração de agentes químicos presentes na solução mineral, também desempenham um papel de distinção entre os minerais (ALVIM, 2022).

Para caracterização da reologia de uma polpa de mineral deve-se levar em consideração a integração de três forças principais, sendo a interação hidrodinâmica, a força existente entre as ligações partícula-partícula e a difusão browniana, onde cada força depende da especificidade de tamanho, forma, rugosidade, do percentual de sólido e das condições físico-químicas da polpa (ALVIM, 2022).

3.6. Interação hidrodinâmica da polpa

A interação hidrodinâmica da polpa de minério explica a forma pela qual as partículas sólidas se comportam em suspensão quando sujeitas a forças provenientes do movimento do fluido, sendo especialmente relevante na indústria de mineração, onde suspensões minerais são comumente encontradas em diversas etapas do processo minerário (DE AGUIAR, 2013).

Quando se tem um sistema em determinada proporção de água e partícula, o movimento particular ao meio é uma resposta à um conjunto de forças que age sobre o material mineral, como a força externa aplicada, a força do peso do próprio material, a força de empuxo e da resistência propiciado pelo fluido à partícula que está em

movimento. Quando o fluido permite com que a partícula apresente resistência, o resultado dessa força é obtido quando se verifica a velocidade da partícula, de sua forma, do percentual de turbulência e da interação partícula-partícula (PEREIRA et al., 2023).

Para determinar o movimento do fluido emprega-se o modelo matemático indicado como número de Reynolds (Re), que descreve a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas que atuam sobre a partícula, proporcionando uma indicação da natureza do fluxo em torno dela, como pode-se observar na equação 2 (BRANDI, 2006).

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

ρ = densidade do fluido.

u = velocidade da partícula relativa ao fluido.

d = diâmetro característico da partícula.

μ = viscosidade dinâmica do fluido.

Ao determinar o regime de fluxo predominante durante a moagem, o número de Reynolds propicia a compreensão de como as partículas se movem no meio, influenciando assim a eficiência do processo e da qualidade final do produto (DE BRITO, 2006). Além disso, a capacidade de estimar a viscosidade efetiva do fluido durante a moagem com base no número de Reynolds possibilita uma análise aprofundada de como a viscosidade afeta não apenas a moagem em si, mas também o desgaste das partículas e a eficiência global do processo (BARBOSA, 2022).

Com a aplicação do modelo matemático é possível avaliar a distribuição granulométrica do material, sendo um dos principais estágios que proporcionam a eficiência da moagem (ARENARE et al., 2009). Nesse contexto, o número de Reynolds elucidada a compreensão de como o comportamento reológico do fluido afeta a distribuição final das partículas permitindo a realização de ajustes nas condições de moagem para atender precisamente aos requisitos de tamanhos desejados, evitando desgastes do material, proporcionar uma melhor eficiência energética, uma vez que com os parâmetros operacionais de moagem bem delimitados tende-se a obter uma otimização do processo (MARTINS; SOARES; VIANA, 2013).

3.7. Forças entre as partículas

As propriedades reológicas dos minerais são influenciadas pelo tipo de interação entre as partículas presentes na suspensão mineral utilizada no processo de beneficiamento. Além disso, as características do material têm um impacto direto no estado de agregação e estabilização desses materiais, o que por sua vez afeta a viscosidade da suspensão resultando em diferentes níveis de coagulação ou sedimentação das partículas (PENNA; MARTINS; DA SILVEIRA, 2022).

A interação entre partículas em suspensões minerais é regida por forças fundamentais, sendo a energia da dupla camada elétrica e a energia de van der Waals duas das principais forças em consideração (SOUSA FILHO; SERRA, 2015). Essas forças, baseadas no modelo de estabilidade denominado teoria DLVO clássica, desenvolvido por Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek, são cruciais para prever a estabilidade de suspensões coloidais com base na distância entre as partículas.

No entanto, a teoria DLVO clássica, ao ser aplicada à descrição do comportamento de partículas em suspensões, apresenta limitações, pois não incorpora fatores significativos como as forças de hidratação e o efeito estérico de repulsão. Esses fatores tornam-se evidentes em polpas de minério, especialmente devido à presença simultânea de minérios heterogêneos e compostos orgânicos em suspensão (TRENKENSCHUH; FRIESS, 2021).

Diante dessa complexidade e da necessidade de uma abordagem mais abrangente, surge a DLVO estendida, ou X-DLVO, como a teoria mais atualmente empregada (SOUSA FILHO; SERRA, 2015). Essa versão estendida da teoria DLVO supera as limitações da abordagem clássica, incorporando elementos como forças de hidratação e efeito estérico de repulsão, tornando-a mais adequada para descrever sistemas complexos, notadamente aqueles que envolvem uma ampla variedade de minérios heterogêneos e compostos orgânicos.

O avanço proporcionado pela teoria DLVO estendida é particularmente valioso em setores industriais cruciais, incluindo a mineração, produção de cerâmica, fabricação de produtos farmacêuticos, e outros processos que demandam a manipulação eficiente de suspensões concentradas (SILVA; PINEDA; BERGAMASCO, 2015). Ao compreender detalhadamente as interações entre as partículas, a DLVO estendida contribui para a otimização de processos industriais,

promovendo eficiência e sustentabilidade na indústria de mineração e em atividades correlatas.

3.8. Difusão browniana

Dentre os comportamentos pertinentes as partículas presentes na polpa do minério, é essencial considerar o impacto que a difusão browniana exerce na suspensão (FERREIRA; SIMONELLI; DOS SANTOS, 2020). A difusão browniana descreve o movimento aleatório de migração das partículas presentes na polpa, que tendem a migrar de regiões concentradas para regiões que possuam uma baixa concentração, ocorrendo em um trajeto irregular como uma consequência direta de suas colisões com as paredes do equipamento (SOUZA; MOHALLEN; DE SOUSA, 2011).

Uma das implicações mais notáveis é a influência do movimento browniano na viscosidade da suspensão, pautando que as partículas em movimento constante geram uma resistência ao fluxo do líquido, o que acaba aumentando a viscosidade do sistema, dessa forma, quanto mais partículas estão presentes em suspensão, mais viscosa se torna a mistura (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Além disso, o movimento browniano também implica na distribuição das partículas após o processo de moagem, uma vez que partículas maiores tendem a sedimentar mais rapidamente, enquanto as menores são mantidas em suspensão devido à agitação térmica (MARTINS; TRINDADE, 2012).

Durante o processo de moagem, é comum que ocorra a aglomeração de partículas ou a desaglomeração de aglomerados pré-existentes, nesse cenário, o movimento browniano assume um papel central na separação e redistribuição dessas partículas. Compreender e controlar o movimento browniano é, portanto, de suma importância para otimizar o processo de moagem, uma vez que não afeta e, conseqüentemente, a economia de energia envolvida. Em situações onde se tem partículas de diferentes tamanhos e densidades, o movimento browniano também pode influenciar a segregação das fases ao longo do processo de moagem (MARTINS; TRINDADE, 2012).

3.9. Utilização de dispersantes na moagem do minério

O processo de moagem de minério é uma das etapas mais energeticamente intensivas na indústria da mineração, e seu consumo de energia está diretamente relacionado à concentração de sólidos na polpa. Esse consumo pode variar devido a diversos fatores, incluindo as propriedades do minério, como dureza e abrasividade, e características específicas do moinho utilizado, como configuração, taxa de alimentação, tempo de moagem e velocidade de rotação (DA SILVA; DE AZEVEDO 2021).

Para reduzir os custos operacionais e alcançar ganhos energéticos, é comum empregar dispersantes químicos. Estes, predominantemente compostos por polímeros e surfactantes, visam desagregar e manter as partículas da polpa mineral em suspensão (ROCHA, 2019). A redução da aglomeração proporcionada pelos dispersantes aumenta a eficiência da moagem, ao evitar a formação de grumos e facilitar a separação das partículas, resultando em uma área de superfície mais exposta ao processo de cominuição e, portanto, em uma quebra mais efetiva e rápida (DE MORAIS et al, 2021).

A polpa de minério constitui uma suspensão, no qual as partículas sólidas são dispersas em meio líquido (ROCHA et al., 2021). Nesse tipo de suspensão, as partículas têm uma tendência natural a se aglomerar e sedimentar devido às forças de atração eletrostática e de van der Waals entre elas. Essa aglomeração pode levar à formação de depósitos ou à segregação de sólidos, prejudicando a eficiência da moagem e resultando em custos adicionais, já que partículas maiores são mais difíceis de moer e podem causar distribuições desiguais de carga no moinho (PULZ; CUNHA; FORMOSO, 1998).

Os dispersantes atuam reduzindo a força de atração entre as partículas, permitindo que estas permaneçam uniformemente dispersas por mais tempo. Eles criam uma camada protetora ao redor das partículas, evitando a aglomeração e sedimentação. Isso impede que as partículas se aproximem excessivamente devido às forças intermoleculares (STELLA; DUARTE; PEREIRA, 2020).

A estabilidade coloidal, que indica a uniformidade da suspensão, é determinada pela capacidade de resistir à agregação e sedimentação ao longo do tempo. Assim, uma suspensão é considerada estável quando não há uma variação significativa no número de partículas em relação ao tempo. Essa estabilidade é essencial para

garantir uma moagem consistente e eficaz, contribuindo para a eficiência operacional e a redução de custos na operação de mineração (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013).

3.10. Mecanismo de ação e tipos de dispersantes

Existem diversos tipos de dispersantes utilizados no processo de moagem, cada um deles é projetado para responder às necessidades específicas de cada tipo de minério e condição do processo (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). A escolha do dispersante está diretamente relacionada às particularidades do minério em análise, assim como às condições operacionais que regem o processo de moagem, sendo essencial a realização de uma análise detalhada das características do minério, incluindo sua composição mineralógica, granulometria e propriedades físicas e químicas (FERNANDES et al., 2021)

É possível dividir os dispersantes em duas classes principais, sendo: reagente inorgânicos, como silicatos solúveis, fosfatos, ácidos sulfossuccínico e ácido fosfônico, e dispersantes poliméricos, como poliácridatos, poliácridamida (PAM), carboximetilcelulose (CMC), polímeros aniônicos e catiônicos e polímeros modificados (DE MORAIS et al., 2021).

3.10.1.1. Dispersantes inorgânicos

Os dispersantes inorgânicos correspondem a compostos químicos que não contém carbono em sua estrutura. Um exemplo de dispersante inorgânico é o metassilicato de sódio, que atua através da adsorção na superfície das partículas minerais. De acordo com a pesquisa realizada por Totou et al. (2011), a utilização do dispersante metassilicato de sódio proporcionou um grau de dispersão equivalente a 21% em uma amostra de minérios itabiríticos, em comparação ao grau de dispersão de 20% proporcionado pelo dispersante, também inorgânicos, hexametáfosfato (ORTEGA et al., 1997). Na tabela 1 é possível verificar os principais dispersantes insolúveis utilizados na etapa de moagem do ferro, assim como o modo o qual são primordialmente utilizados.

Tabela 1 – Dispersantes inorgânicos

Dispersantes	Uso	Exemplo
--------------	-----	---------

Silicatos solúveis	Proporcionam o aumento da dupla camada elétrica por meio da ligação de hidrogênio, promovendo assim a adsorção química	Metalssilicato de sódio
Fosfatos solúveis		Hexametafosfato; Pirofosfato; Ortofosfato.
Sais alcalinos		Hidróxido de sódio (NaOH); Aluminato de sódio (NaAlO ₂); Fluoreto de sódio (NaF).

Fonte: elaborado pelo autor.

Um fator a ser considerado na utilização de dispersantes é a avaliação do efeito da dupla camada elétrica, que consiste em um fenômeno eletroquímico que ocorre em interfaces de partículas sólidas em meio líquido. Com a introdução dos dispersantes, ocorre uma alteração na dinâmica da dupla camada elétrica. Em primeiro lugar, os dispersantes podem modificar a carga superficial das partículas, o que tem o efeito de reconfigurar a distribuição de cargas na interface partícula-solução, como consequência, a força de repulsão eletrostática entre as partículas pode é reduzida (SCHAFFAZICK et al., 2003).

3.10.1.2. Dispersantes poliméricos

Os dispersantes poliméricos são componentes químicos que são formados por cadeias moleculares extensas e complexas denominadas de polímeros, que desempenham um papel essencial em operações de moagem e flotação. Sua importância reside na capacidade de facilitar a dispersão eficaz das partículas minerais em suspensão (FERNANDES et al., 2021). As cadeias moleculares longas dos dispersantes poliméricos formam uma barreira de protetora em torno das partículas, evitando que se aproximem em excesso umas das outras, resultando em uma dispersão mais uniforme e eficiente das partículas na suspensão (GOMES; DO VALE; PINCANÇO, 2023).

Alguns exemplos de polímeros utilizados como dispersantes na moagem de minério incluem poliacrilatos, poliésteres, poliestirenos, poliuretanos e polialquilenglicóis. A escolha do tipo de dispersante dependerá de fatores como o tipo de partículas a serem dispersas, o meio líquido e as condições específicas da aplicação (PEGORARO et al., 2023).

Os poliacrilatos são frequentemente empregados em sistemas aquosos, proporcionando uma dispersão eficaz das partículas sólidas, contribuindo para a eficácia do processo minerário, enquanto os poliuretanos se destacam em aplicações que requerem resistência a condições ambientais adversas, como a alta umidade ou a exposição de agentes corrosivos (DE FIGUEIREDO et al., 2022). Por sua vez, os poliestirenos são utilizados devido a sua eficácia em suspender partículas sólidas em líquidos orgânicos. Já os polialquilenglicóis, com sua capacidade de formar complexos estáveis, são utilizados particularmente em minérios que demandam uma dispersão estável e uniforme, como minerais com características específicas de granulação ou dureza (DE MORAIS et al., 2021).

3.10.3. Avaliação da efetividade de dispersantes na moagem

A eficiência da utilização de dispersantes na moagem de minério pode ser avaliada por meio de vários métodos e parâmetros, como a análise da distribuição de tamanho de partículas após a moagem, processo conhecido como análise granulométrica, que realiza uma avaliação das partículas de uma dada amostra mineral em peneira de diferentes diâmetros (NASCIMENTO et al., 2022).

A análise por meio da avaliação da granulometria do material inicia com a homogeneização da amostra, sendo uma amostra selecionada em quantidade representativa, seguindo pela seleção das malhas granulométricas as quais as amostras percorreram, sendo escolhidas de maneira a abranger a maior distribuição possível. Com base nas pesagens é realizado cálculos matemáticos, como a avaliação da porcentagem das frações passantes e retidas nas malhas, passando posteriormente pela plotação de curvas granulométricas, que implicam na avaliação dos resultados com e sem a adição de dispersantes (NASCIMENTO et al., 2022).

Ao interpretar a curva granulométrica obtida após a moagem com a adição de dispersantes, é possível identificar padrões que indicam a eficiência do processo. Uma curva mais estreita e mais próxima do eixo horizontal sugere uma distribuição mais uniforme das partículas, o que aponta para uma moagem eficaz. Comparando os resultados com dados prévios obtidos em condições sem a utilização de dispersantes, é possível quantificar o impacto desses agentes de dispersão na eficiência da moagem. A redução das partículas mais grosseiras e a uniformidade da distribuição são indicadores claros de uma moagem mais eficaz com o emprego dos dispersantes (NUNES, 2022).

4. METODOLOGIA

4.1. Amostragem

A amostra analisada foi obtida na Mina Cauê da mineradora Vale S. A. localizada da cidade de Itabira – MG. O minério cabeça correspondeu à hematita, com um total de 108 kg sendo distribuídos em 9 sacos contendo 12 kg de amostra em cada (figura 1). O material foi retirado da correia alimentadora do moinho da planta de beneficiamento apresentando o comprimento inferior a 19.05 mm



Figura 1 - Minério de cabeça de itabirito.

4.2. Quarteamento amostral

O quarteamento amostral foi realizado no Laboratório de Tratamentos da Universidade Federal de Minas Gerais, vinculado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. A amostra foi distribuída entre 18 tabuleiros com cerca de 6 kg de material em cada. Os tabuleiros foram submetidos a temperatura de 200°C em uma estufa de secagem pelo período de 24 horas. Decorrido o tempo de secagem, 54 kg de amostra foram condicionados como minério de testemunho em um quarteador tipo Jones de divisor de riffles nº 90 e 12 calhas da marca Dialmática® (figura 2a), enquanto os outros 54 kg foram quarteados em um quarteador Jones (figura 2b), da marca Dialmática® de divisor de riffles N° 30 com 12 calhas e conseqüentemente em um outro quarteador Jones (figura 2c). O procedimento foi realizado de forma contínua, constante e homogênea até a obtenção de amostras de 1.77 kg. Por fim, as amostras foram pesadas, ensacadas e levadas para as análises posteriores.



Figura 2 – Quarteadores tipo Jones

4.3. Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada em uma duplicata de amostras para validação dos resultados, sendo essas codificadas como AM 1-CA e AM 2-CA. Para a determinação dos parâmetros mineralógicos da hemática utilizou-se a técnica de Microscopia Óptica de Luz Refletida (MO). Para isso, preparou-se a amostra a partir de seções polidas de 30 mm, utilizando-se resina *Epoxyglass* para o endurecimento do minério na proporção de 5:1. Além disso, a fim de evitar a formação de bolhas, adicionou-se entre 5 a 10% de acetona no volume total da mistura. A quantificação mineralógica (%) foi obtida por meio de microdivisor rotativo para a porcentagem mineralógica global, enquanto a análise mineralógica modal foi realizada por meio da estimativa da área em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), no qual as varreduras ocorreram na área de 25 campos da seção polida. As análises mineralógicas foram validadas em comparação aos resultados obtidos para a caracterização química, que por sua vez foi realizada através da técnica de Difração de Raios-X (DRX).

4.4. Teste de peneiramento

O teste de peneiramento foi conduzido afim de simular o controle operacional da planta na mina de Cauê, abrangendo até a primeira linha de medição. Este processo reproduziu a distribuição do tamanho de partículas utilizando a função de distribuição $y=(1-\exp)[-(x/k)^m]$. O objetivo principal foi determinar a quantidade de minério de entrada necessária para o trabalho, estabelecer a quantidade de tempo de

moagem adequada, e definir a malha granulométrica necessária para a amostra processada.

O processo de moagem foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu na determinação das métricas de processamento necessárias para realização do ensaio, para tal utilizou-se correlações aritméticas tendo como base a tabela de controle de processo da Mina Cauê (tabela 2). Desse modo determinou-se a massa de material, a quantidade de água e solventes necessários, a velocidade de rotação do moinho e o tempo de processamento do minério, ressaltando-se que o processo simulado da Mina Cauê foi adaptado para reprodução em um moinho de bolas de bancada. Por sua vez, a segunda etapa do teste de peneiramento correspondeu a adição de 8.53 kg de minério no corpo moedor com o diâmetro de 2 cm, em uma razão de 1:10 do tamanho do moinho com o comprimento de 8 polegadas. Utilizou-se a velocidade de rotação de 76.15 RPM, em um tempo de moagem de 10 minutos.

Tabela 2 - Controle de processo da mina de Cauê – Hematita (% passante acumulado)

Malha (mm)	Ali. Desl. 1^a	UF Desl. 1^a	OF Desl. 1^a	UF Desl. 2^a	OF Desl. 2^a
1.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.840	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.710	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.500	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.420	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.210	99.85	99.75	100.00	100.00	100.00
0.150	96.39	94.24	100.00	100.00	100.00
0.105	84.61	75.53	99.81	99.71	100.00
0.075	65.62	47.39	96.14	94.04	100.00
0.053	44.84	22.72	81.87	72.08	99.89
0.045	38.05	16.60	73.96	60.19	99.31
0.037	32.64	12.63	66.15	49.09	97.55

OF: Over flow; UF: Under flow; Desl: Deslapagem.

Fonte: adaptado de manual de operações de Cauê – Vale

Utilizou-se uma série padrão de malhas granulométricas contando inicialmente com 12 malhas, sendo 13.5, 9.5, 6.35, 4.75, 3.40, 2.36, 1.7, 1.18, 840, 600 e 425 μm sendo o processo realizado a seco. O passante retido nas malhas de maior diâmetro

foi submetido a uma nova secagem em estufa a 200°C. Após o procedimento utilizou-se mais 6 malhas subsequentes, sendo 300, 212, 150, 106, 75, 53, 38 µm. A segunda etapa foi realizada em um peneiramento a úmido. A cada peneiramento realizou-se a coleta do material, tendo a consequente pesagem da massa retida. Por fim calculou-se o percentual retido e passante. Todo processo foi realizado no Laboratório de Tratamentos da Universidade Federal de Minas Gerais.

4.5. Reagentes

A eficiência da moagem é avaliada em termos do rendimento do moinho e do consumo específico de energia do equipamento ao final do processo minerário. Assim, a análise de cominuição de minério foi realizada com seis dispersantes comerciais descritos na tabela 3. Para o teste de peneiramento foram utilizadas três proporções distintas de cada reagente, sendo 50 g/t, 100 g/t e 200 g/t.

Tabela 3 - Reagentes testados como aditivos de moagem

Reagente	Nome comercial	Fabricante	Descrição química
Polímero Acrílico	Solutrix 100	BASF	Polímero acrílico, aniônico, em água
	Solutrix A40	BASF	Solução aquosa à base de: polímeros acrílicos
	Solutrix D	BASF	Solução aquosa à base de: Polímero acrílico
	Solutrix L 200	BASF	Ácido poliacrílico, sal de sódio, em água
Confidencial*	CADM 22-369	CLARIANT	Confidencial*
	CADM 22-370	CLARIANT	Confidencial*

*Informação fornecida pelo fabricante.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise mineralógica e química

Nas figuras 3a e 3b, que representam a amostra AM 01-CA, ampliadas no comprimento de 100 μ m, é possível observar a presença de hematita, óxidos, quartzo e outros minerais.

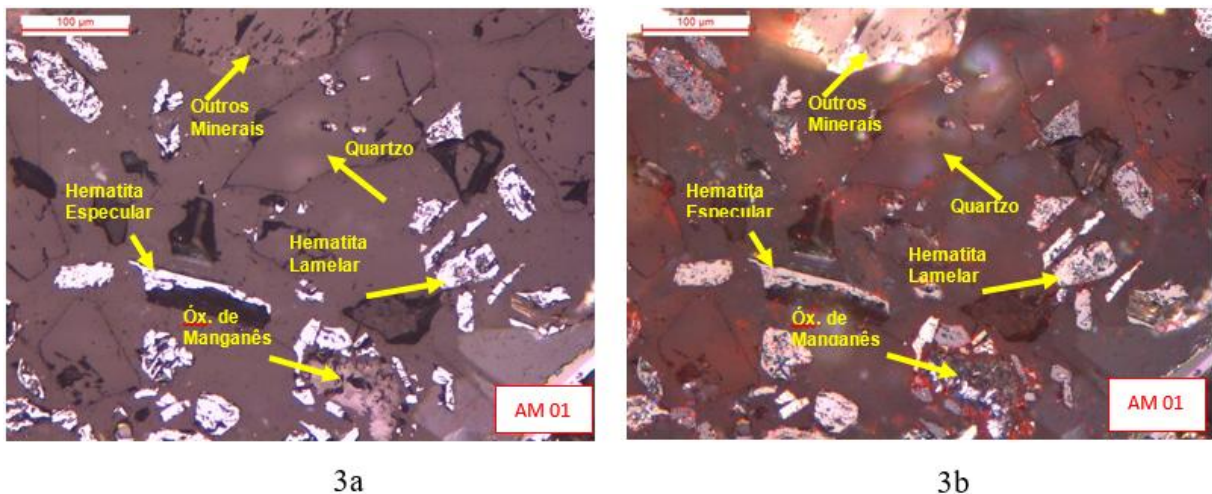


Figura 3 - Fotomicrografias da amostra AM 01-CA

Por sua vez, a amostra AM 02-CA, além de apresentar as hematitas especular e lamelar, óxido de manganês e quartzo, apresentou percentuais consideráveis de goethita maciça e caulinita (figura 4a e 4b).

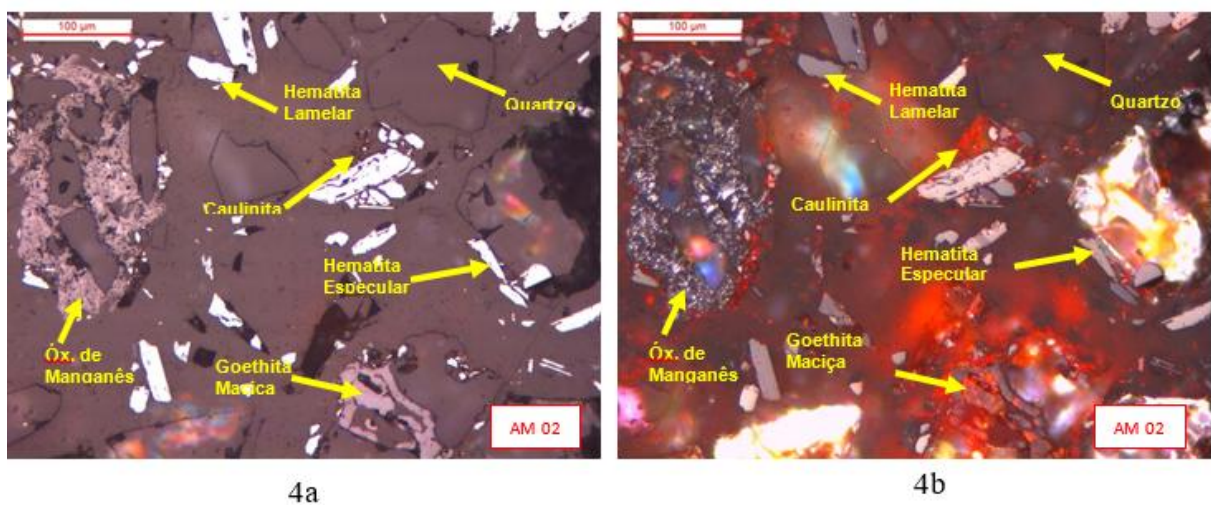


Figura 4 - Fotomicrografias da amostra AM 02-CA.

De acordo com a quantificação mineral das amostras, a porção AM 01-CA apresentou majoritariamente a presença de hematitas compactadas, com 69.19%, enquanto a amostra AM 02-CA apresentou um total de 64.70%. O segundo minério em maior proporção nas amostras correspondeu ao quartzo, com um percentual de 28.18% em AM 01-CA e 33.94% em AM 02-CA, como é possível verificar na figura 5.

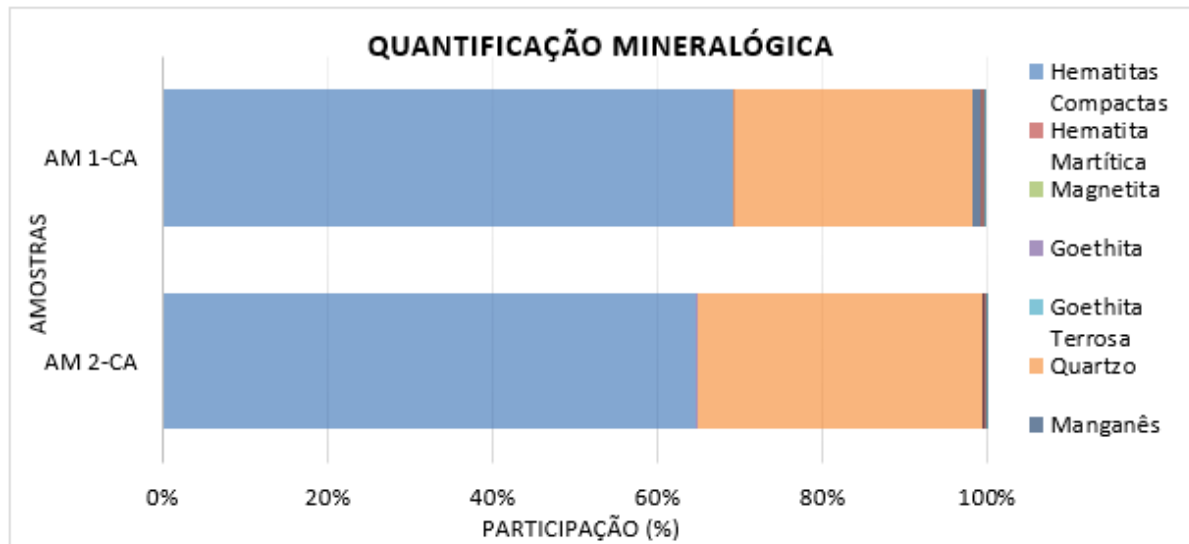


Figura 5 - Quantificação mineralógica das amostras AM 01-CA e AM 02-CA.

Além da porção majoritária de hematitas compactas e quartzo, outros minerais foram encontrados em diferentes proporções nas duas amostras, como hematita granular em AM 01-CA, com 18.88% e hematita especular em AM 02-CA, com 14.58% (tabela 4).

Tabela 4 - Quantificação mineralógica (%).

Amostra	Mineral						
	HE	HL	HG	HS	HC	GMac	GO
AM 01-CA	9.09	40.61	18.88	0.61	69.19	0.06	0.06
AM 02-CA	14.58	37.47	12.60	0.04	64.70	0.15	0.15
	QL	QM	QZ	MN	CA	OT	Porosidade
AM 01-CA	28.18	0.72	28.90	0.97	0.56	0.31	16.76
AM 02-CA	33.94	0.54	34.48	0.13	0.48	0.05	15.96

HE: hematita especular; HL: hematita lamelar; HG: hematita granular; HS: hematita sinuosa; HC: hematita compacta; GMac: goethita maciça; GO: goethita; QL: quartzo livre; QM: quartzo misto; QZ: quartzo; MN: óxido de manganês; CA: caulinita; OT: outros minerais.

Como mineral predominante nas amostras, a hematita compactada é um mineral que possui caráter hidrofílico, desse modo para efetuação de sua flotação é

necessário a utilização de tecnologias corretas com o intuito de induzir o caráter hidrofóbico do mineral. Em vista disso, Martins; Lima; Leal Filho (2012) avaliaram a influência do condicionamento de amido de milho sobre a flotabilidade de diferentes tipos de minerais provenientes da Vale, dentre os objetivos dos autores com a pesquisa, destaca-se a separação da hematita compactada das amostras, o qual verificou-se que o condicionamento de amido em amostras minerais utilizando uma porção com pH entre 8 e 8,5 tende a reduzir o teor de Fe, aumentando a afinidade do material com as partículas aquosas.

Considerando a formação do minério, que é composto basicamente por óxidos metálicos, os principais óxidos identificados nas amostras foram o óxido de ferro (FeO_2), óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Através da técnica de DRX-EDS quantificou-se a composição química por mineral, verificando que as hematitas compactadas estavam compostas majoritariamente por FeO_2 , com percentual superior a 96% para as duas amostras, os quartzos livres por SiO_2 , sendo 98.59% para a amostra AM 01-CA e 92.99% para AM 02-CA, enquanto a caulinita presente na amostra AM 01-CA apresentou o maior percentual de Al_2O_3 (Tabela 5).

Tabela 5 - Distribuição química por mineral (%).

Amostra	Componente químico										
	Fe_2O_3				SiO_2			Al_2O_3			
	HC	HM	MA	GO+GT	QL	QM	GT	CA	GT	CA	GB
AM 01-CA	98,38	0,00	0,00	1,62	98,59	1,23	0,07	0,10	52,13	33,49	14,37
AM 02-CA	97,48	0,00	0,00	2,52	92,99	0,13	0,12	6,76	3,59	96,41	0,00

HC: hematita compactada; HM: hematita martítica; MA: magnetita; GO+GT: goethita e goethita terrosa; QL: quartzo livre; QM: quartzo misto; CA: caulinita; GT: goethita terrosa; GB: gibbsita.

5.2. Análise granulométrica

Através da modelagem matemática descrita na seção 4.4, foram realizados testes de passante acumulado em intervalos de 15, 30, 45 e 60 minutos, com base no

sistema de controle simulado do processo da mina de Cauê para a malha de 150 μm . Os resultados desses testes estão detalhados na Tabela 6 e na Figura 6.

Tabela 6 – Percentual de passante acumulado para a malha de 150 μm .

Tempo (min)	Passante acumulado (%)
15	95,99
30	99,11
45	99,80
60	99,82

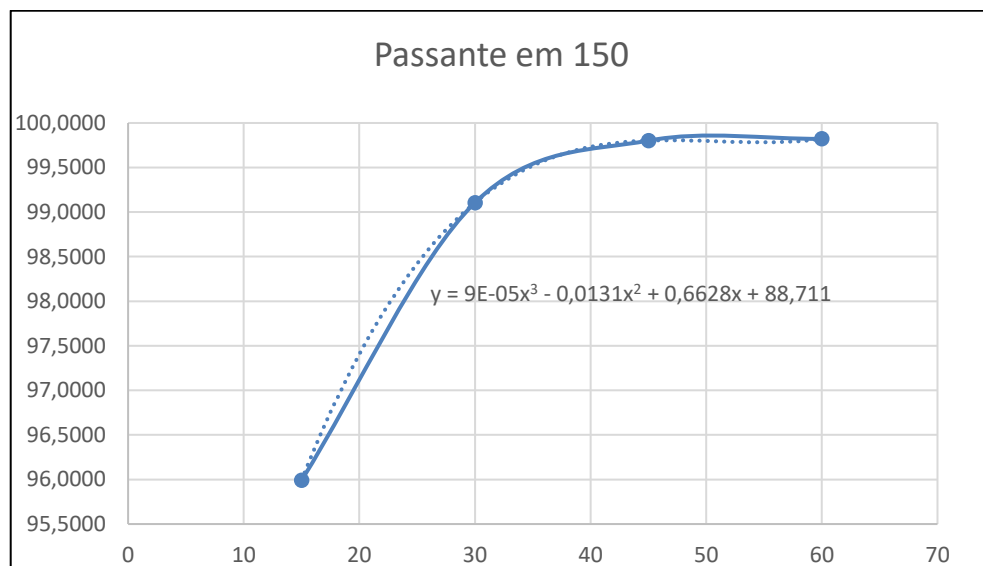


Figura 6 – Curva de passante acumulado (%).

Na simulação do processamento na mina de Cauê, constata-se que, para uma malha de 150 μm , o percentual ideal de material que passa é de 94,24%, conforme indicado na Tabela 2. Essa escolha de malha relativamente fina é crucial para alcançar um bom resultado no processo de moagem. A concentração de minério de 94,25 g/t mostra-se ideal para otimizar a eficiência de separação, aumentar a recuperação do mineral e reduzir o consumo de energia no processo.

Apesar da maior demanda energética associada a malhas mais finas durante a moagem, a malha de 150 μm garante uma separação eficaz, resultando, por conseguinte, em economia de energia nas etapas posteriores do beneficiamento. Levando isso em conta, foram realizados testes de modelagem matemática, conforme

ilustrado na Figura 6, variando os tempos de moagem entre 10, 11, 12, 13 e 14 minutos, como detalhado na Tabela 7.

Os resultados indicaram que o tempo de moagem de 10 minutos se aproximou mais do percentual de passante acumulado ideal de 94,25%, registrando um valor de 94,13%. Isso sugere que um tempo de moagem de 10 minutos é mais eficaz para alcançar uma distribuição granulométrica próxima do ideal. Com o tempo ideal de moagem definido, ajustes foram feitos com base na planta, incluindo o tamanho do moinho, grau de enchimento, carga moedora, velocidade crítica, taxa de alimentação, potência do moinho e densidade do minério, conforme mostrado na Tabela 8. Esses ajustes permitiram iniciar os testes de granulometria com e sem o uso de reagente.

Tabela 7 – Modelagem da análise granulométrica.

Parâmetro	Medida
Tamanho do moinho	18'x29'
Grau de enchimento	29%
Carga moedora	270 t
Velocidade crítica	13,62 RPM
Taxa de alimentação	900 e 1.050 t/h
Potência do moinho	3.800 kw/h
Densidade do minério	3,67 t/m ³

No presente estudo, os resultados da análise revelaram que a presença de reagentes exerce um impacto significativo na passagem do material pelas malhas granulométricas, conforme evidenciado pela comparação entre os dados obtidos nos testes com reagentes e nos testes sem reagente. Ao observar a Figura 7, é possível notar claramente a diferença nas curvas granulométricas entre as amostras com dispersantes e as amostras sem dispersantes. As curvas correspondentes às amostras com dispersantes mostram uma distribuição mais uniforme das partículas, com uma redução significativa no tamanho das partículas em comparação com as amostras sem adição de reagentes dispersantes.

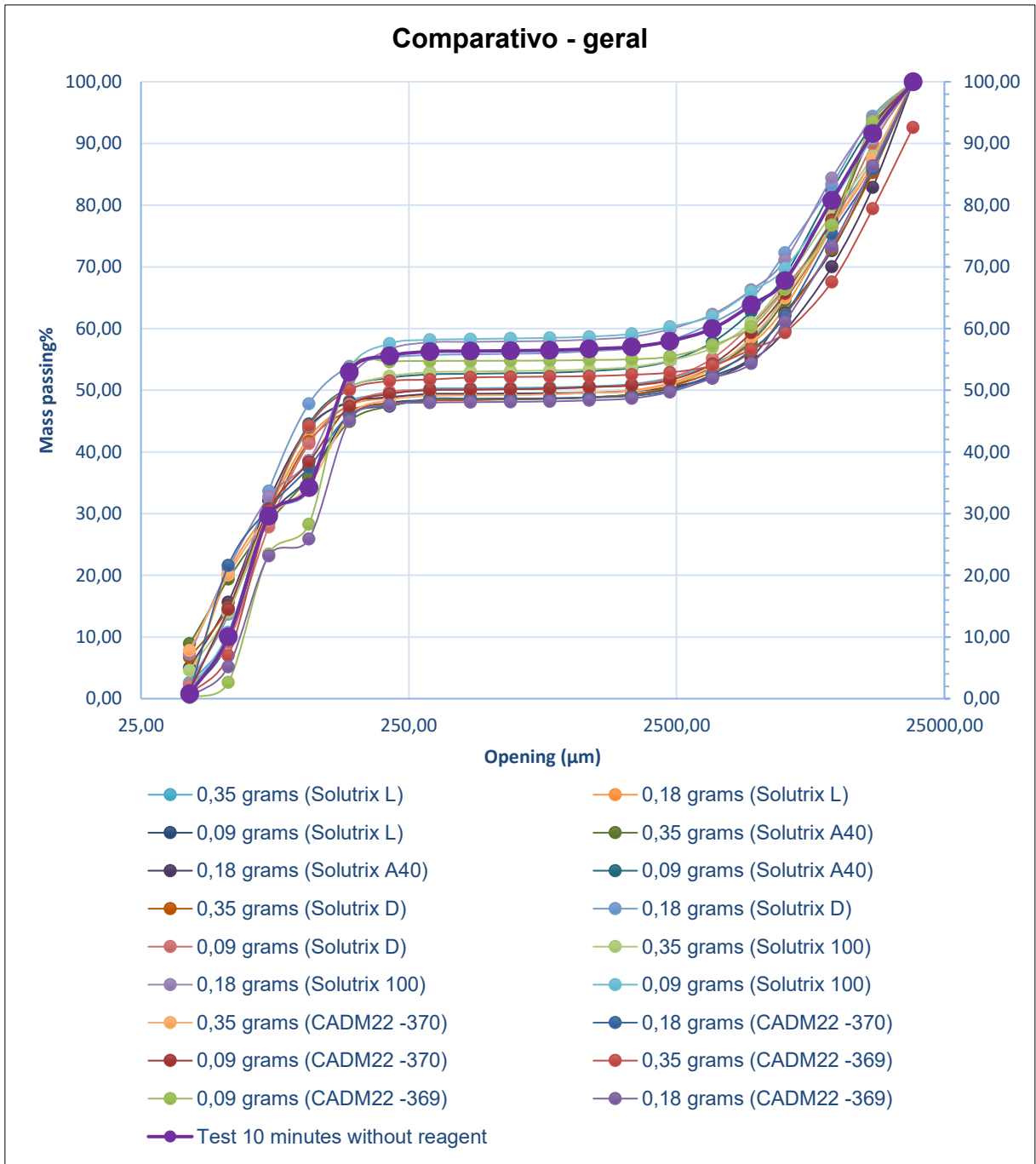


Figura 7 - Comparativo geral das curvas granulométricas.

Na análise das curvas granulométricas, é esperado que a presença de reagentes influencie a distribuição do material em diferentes tamanhos de partículas, resultando em variações nos percentuais de passante acumulado em relação aos testes sem reagente. O estudo revelou que na malha de 19.09 mm, a solução sem reagente alcançou 100% de passante acumulado, indicando que todo o material passou por essa abertura. Entretanto, na malha de 150 μm , a solução sem reagente registrou um percentual de passante acumulado de 52,94%, sugerindo uma parte

substancial do material não atravessou essa malha, ressaltando a heterogeneidade inicial na distribuição granulométrica.

Ao comparar com os resultados obtidos nas suspensões contendo reagentes, especialmente na solução com 100 g/t do reagente CADM 22-369, observamos uma redução significativa para 45,08% no percentual de passante acumulado na malha de 150 μm . Essa observação sugere que a adição desse reagente específico teve o efeito desejado de diminuir a passagem de material pela malha de menor abertura.

Os objetivos de influenciar a granulometria e otimizar o processo, indicados pelos resultados nas curvas granulométricas, foram alcançados. A presença do reagente CADM 22-369 demonstrou eficaz modificação na distribuição de tamanhos de partículas, indicando potencial para aprimoramento do processo de moagem. A diminuição do percentual de passante acumulado na malha de 150 μm evidencia a eficácia controlada da adição do reagente, proporcionando uma melhor seletividade granulométrica.

Os resultados revelados pelo teste sem reagente indicam consistentemente um percentual de passante acumulado mais elevado em comparação com as soluções peneiradas com reagentes até a malha de 150 μm , salvo nas concentrações de 50 g/t e 100 g/t utilizando o reagente Solutrix 100. Notavelmente, a concentração de 50 g/t contendo o reagente Solutrix 100 nas malhas com aberturas inferiores a 150 μm apresentou um percentual de passante acumulado semelhante ao do teste sem reagente, conforme ilustrado na Figura 8. Esses achados sugerem que, em determinadas concentrações do reagente Solutrix 100, o efeito na passagem de material pela malha de 150 μm foi comparável ao teste de referência sem reagente, ressaltando a complexidade da interação entre os reagentes e o processo de peneiramento granulométrico.

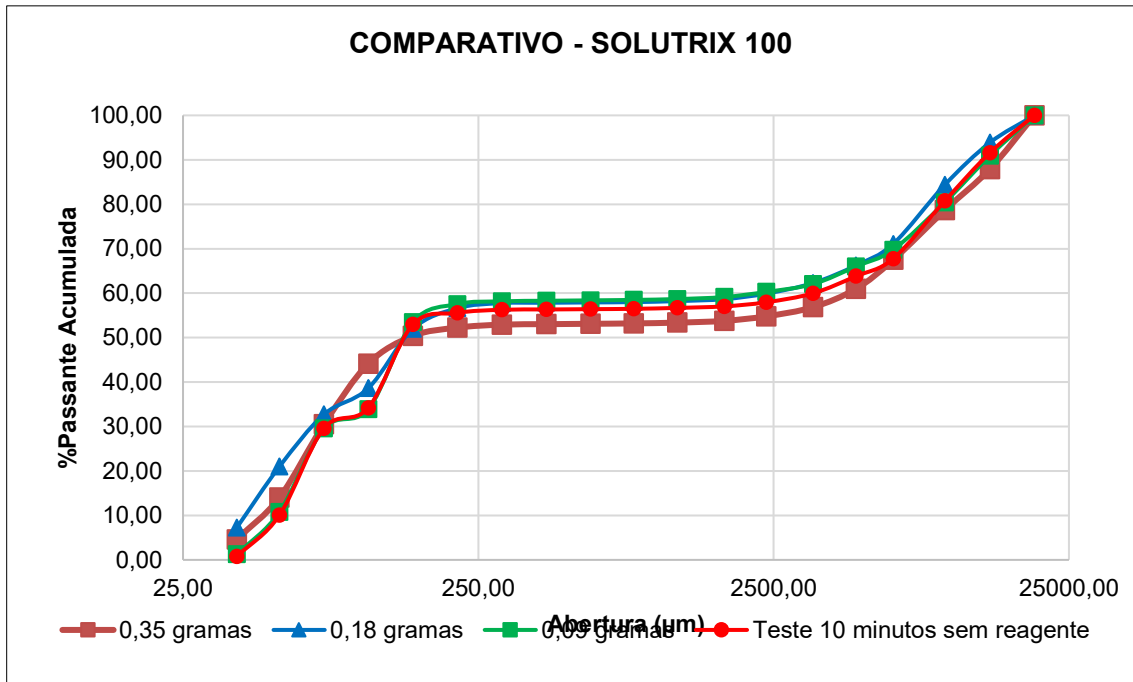


Figura 8 - Comparativo das curvas granulométricas do reagente Solutrix 100 com o teste sem reagente.

Além disso, a utilização do Solutrix 100, assim como as soluções contendo a concentração de 100 g/t do reagente Solutrix D (Figura 9) e a solução contendo 50 g/t de Solutrix A40 (Figura 10), até a malha granulométrica de 6,35 mm, apresentaram %passante acumulado superior aos testes sem reagente, com valores de 72,26% e 68,62%, respectivamente.

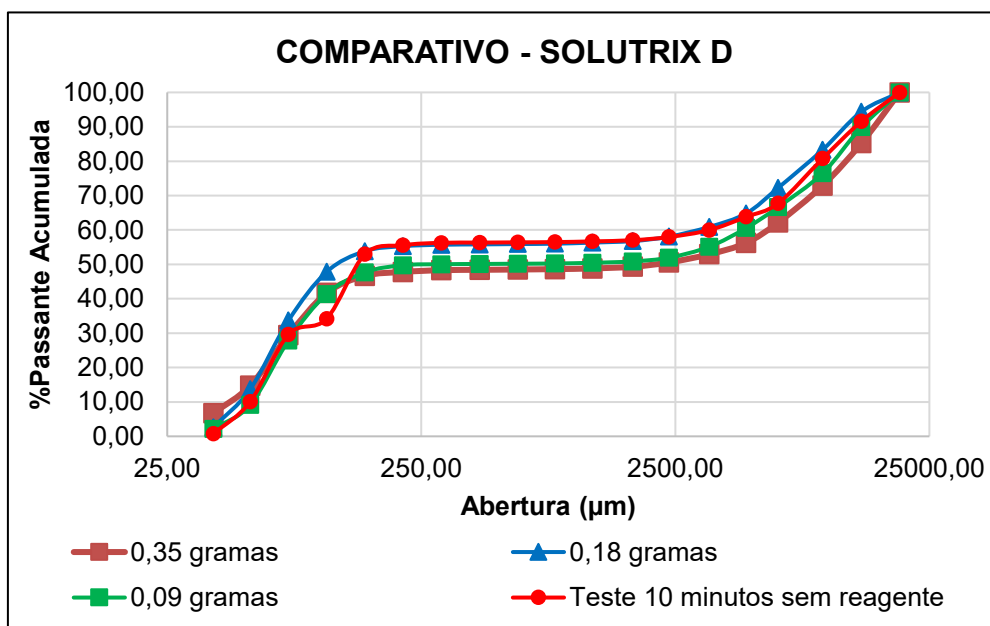


Figura 9 - Comparativo das curvas granulométricas do reagente Solutrix D com o teste sem reagente.

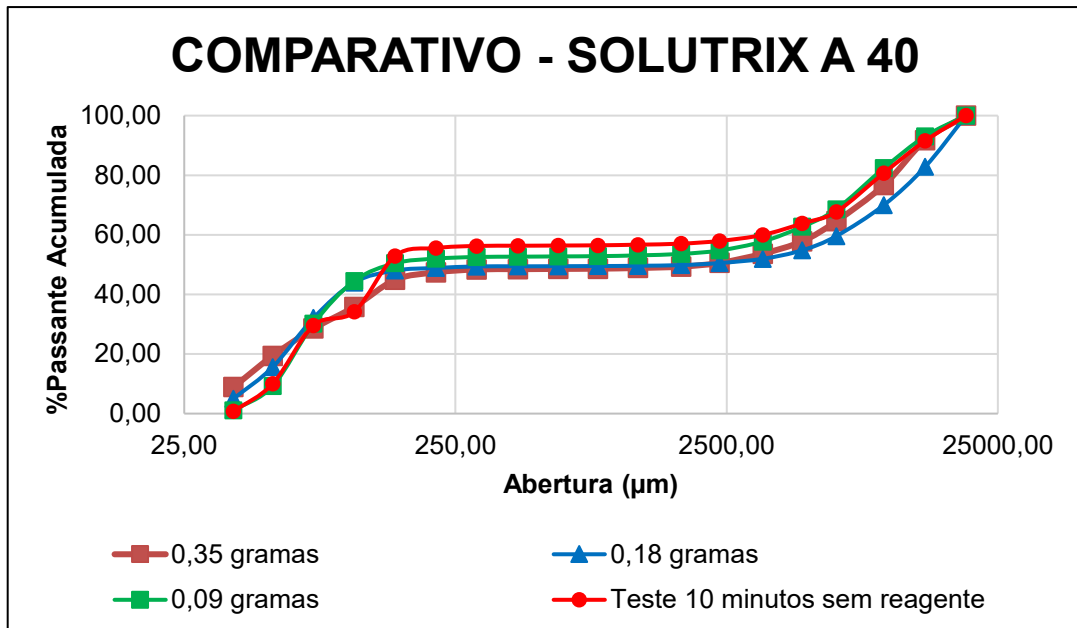


Figura 10 - Comparativo das curvas granulométricas do reagente Solutrix A40 com o teste sem reagente.

A análise das curvas granulométricas nas Figuras 5, 6 e 7 revela uma linearidade no padrão de %passante acumulado ao usar malhas com abertura de 3,4 mm a 150 µm. Observa-se um decaimento nas curvas quando as amostras são inseridas na malha de 106 µm a 38 µm, representando malhas mais finas utilizadas no processo.

Estes resultados sugerem que a presença dos dispersantes teve um impacto significativo na distribuição das partículas em tamanhos variados, promovendo uma notável melhoria na passagem do material pelas malhas granulométricas. A eficácia demonstrada por esses dispersantes, particularmente em tais concentrações, destaca sua capacidade única de influenciar a seletividade granulométrica, resultando em percentuais de passante acumulado superiores em comparação aos testes sem reagente

A tabela 8 exhibe os resultados obtidos de %passante acumulado para as aberturas de 150 µm e 38 µm. No que se refere a malha granulométrica de 150 µm, o teste sem reagente estabeleceu um ponto de referência com um percentual acumulado de passantes de 56,27%. Ao introduzir o reagente Solutrix 100, observou-se um aumento nesse percentual em todas as concentrações testadas, indicando uma eficácia positiva do reagente em promover a fragmentação das partículas. Este aumento corresponde aos percentuais de 58,16% (50 g/t), 57,75% (100 g/t) e 59,92%

(200 g/t), sugerindo desse modo uma relação diretamente proporcional entre a concentração do reagente e a eficiência na redução do tamanho das partículas.

Em contrapartida, todas as outras amostras contendo dispersante exibiram percentuais acumulados de passantes inferiores ao teste sem reagente. Isso pode indicar que, nas condições do experimento, a presença dos dispersantes acarreta um efeito negativo, ou não ideal, na fragmentação das partículas para a malha granulométrica de 150 μm .

Ao analisar a malha granulométrica de 38 μm , os resultados revelaram que o teste sem reagente apresentou um percentual acumulado de passantes de 0,76%. No entanto, a adição do reagente Solutrix A40, especialmente na concentração de 200 g/t, resultou em um considerável aumento para 8,90%. Esse aumento expressivo indica que o reagente Solutrix A40 desempenha uma função favorável a fragmentação das partículas em tamanhos menores, sendo o fato evidenciado pelo aumento significativo no percentual de passantes. Por outro lado, as amostras do dispersante CADM 22-369 demonstraram resultados variados, com as concentrações de 50 g/t e 100 g/t apresentando percentuais acumulados de passantes inferiores ao teste sem reagente. A porção contendo 200 g/t do reagente, no entanto, exibiu o mesmo percentual acumulado do teste sem reagente. Essa inconsistência aponta a uma sensibilidade do dispersante à concentração utilizada, destacando a importância da dosagem adequada para otimização dos resultados.

Tabela 8 - Teste de peneiramento na malha recomendada de 150 e 38 μm .

Dispersante	Concentração do dispersante (g)	%Passante
Abertura de 150 μm		
Teste sem reagente	-	56,27
Solutrix 100	0,09	58,16
	0,18	57,75
	0,35	59,92
Solutrix A40	0,09	52,56
	0,18	49,39
	0,35	48,38
Solutrix D	0,09	50,04
	0,18	55,71
	0,35	48,31

Solutrix L 200	0,09	48,37
	0,18	49,14
	0,35	50,24
CADM 22-369	0,09	54,74
	0,18	47,99
	0,35	51,72
CADM 22-370	0,09	50,00
	0,18	48,61
	0,35	49,08
Abertura de 38 μ m		
Teste sem reagente	-	0,76
Solutrix 100	0,09	1,24
	0,18	7,23
	0,35	4,60
Solutrix A40	0,09	1,06
	0,18	5,00
	0,35	8,90
Solutrix D	0,09	2,17
	0,18	2,61
	0,35	6,71
Solutrix L 200	0,09	1,47
	0,18	2,28
	0,35	2,44
CADM 22-369	0,09	0,16
	0,18	0,28
	0,35	0,75
CADM 22-370	0,09	1,28
	0,18	0,92
	0,35	7,82

6. CONCLUSÃO

Os resultados provenientes deste estudo de cominuição apresentam contribuições altamente relevantes para o campo do moagem de minério, notadamente no que tange à utilização de dispersantes. A comparação entre amostras tratadas com reagentes e aquelas analisadas sem adição de reagente revela melhorias significativas na granulometria do material obtido.

Destacando-se como uma estratégia particularmente eficaz, a inserção do dispersante Solutrix A40 (BASF®) demonstra consistência na geração de um material mais fino, abrangendo todas as concentrações examinadas. Esse resultado robustece a eficácia do Solutrix A40, evidenciando sua habilidade em reduzir o tamanho das partículas de maneira uniforme.

Em contraste, os dispersantes CADM 22-369 e CADM 22-370 exibiram o menor percentual de passagem acumulada em comparação com o teste em branco. Contudo, a análise detalhada da curva granulométrica, especialmente na abertura de 106µm para a concentração de 0,35g de CADM 22-369, revela uma eficiência superior em relação ao teste em branco. Essa observação aponta para uma área promissora de investigação em pesquisas futuras, destacando nuances na eficácia desses dispersantes em pontos específicos do processo.

Em resumo, a incorporação de dispersantes como componente essencial do processo de beneficiamento mineral não apenas resulta em um produto final de maior qualidade, conforme evidenciado neste estudo, mas também proporciona vantagens operacionais ao aprimorar a eficiência do processo de moagem. A relevância desses agentes químicos na indústria de mineração é enfatizada, instigando esforços contínuos para aprimoramentos na obtenção de materiais com características granulométricas desejadas. As descobertas desta pesquisa não apenas ampliam a compreensão sobre os efeitos dos dispersantes no beneficiamento mineral, mas também fornecem insights valiosos para orientar futuras pesquisas e práticas operacionais na indústria mineral.

A compreensão da influência de dispersantes na distribuição granulométrica e a identificação de estratégias eficazes para melhorar a seletividade são fundamentais para aprimorar a eficiência operacional e reduzir custos. Essa contribuição tem implicações práticas e econômicas, destacando a relevância do estudo para o avanço contínuo na área de processamento mineral.

7. Sugestão para trabalhos futuros

Para complementação desse estudo, recomenda-se para trabalhos futuros:

- 1) Estudar a alteração da concentração das adoções de dispersantes;
- 2) Realizar testes simulando a mesma concentração na moagem secundária;
- 3) Investigar o uso de reagentes aniônicos sulfonatos e lignossulfonatos);
- 4) Estudar a influência do grau de dispersão e do comportamento reológico da polpa no consumo específico de energia na moagem;
- 5) Avaliar a influência do comportamento reológico da polpa nas etapas subsequentes, como flotação, espessamento e filtragem.

REFERÊNCIAS

ACCOSTUPA, Ebert Baca; CCAMA, Rimber Jesús Farfán. **Técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales. Revisión sistemática.** Universidade Cesar Vallejo, Lima, 2022.

ALVIM, Bianca Dias. **Avaliação do potencial de emprego do bagaço de malte como matéria prima para obtenção de produtos de valor agregado: uma proposta de um processo industrial baseada na revisão da literatura.** Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

ANDRADE, Alexandre Gonçalves; MENEZES, RLA; ATHAYDE, Maycon. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Moagem baseada na Lei de Bond Modificada na Samarco Mineração. 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, n. 44, p. 142-150, 2014.

ARAUJO, Livia Vieira de; FREIRE, Denise Maria Guimarães; NITSCHKE, Márcia. Biossurfactantes: propriedades anticorrosivas, antibiofilmes e antimicrobianas. **Química Nova**, v. 36, p. 848-858, 2013.

ARENARE, Diego de Sousa; RODRIGUES, Otávia Martins Silva; DE ARAUJO, Armando Corrêa; VIANA, Paulo Roberto de Magalhães. de S. et al. Espirais concentradoras no tratamento de minérios de ferro: uma breve revisão. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 5, p. 224-228, 2009.

BARBOSA, Mariana. **Reator de leite fluidizado: revisão de literatura e dimensionamento de reator aplicado em contexto industrial no tratamento do glicerol.** Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

BAUTISTA, Francisco; CEJUDO-RUIZ, Rubén; AGUILAR-REYES, Bertha y GOGICHAISHVILI, Avto. El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. **Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana**, v. 66, n. 2, p. 365-376, 2014.

BELTRÁN, Carlos Andrés; Guevara-Guerrero, Beatriz; Carlos Montero-Montero, Juan; Piedad Valdés-Restrepo, Magda. Encapsulação de compostos bioativos por

emulsão Pickering: revisão. **Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales**, v. 10, n. 1, 2023.

BERNHARDT, I. Claus. Particle size analysis: Classification and sedimentation methods. Springer Science & Business Media, 2012.

BRANDI, Analice Costacurta. Simulação de Escoamentos de Fluidos Incompressíveis a Altos Reynolds. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 7, n. 2, p. 219-228, 2006.

CALEGARI, Caio Lage; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; SILVA, Priscilla Chantal Duarte. Produção de alumínio secundário: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, p. e023013-e023013, 2023.

CHAVES, Nayane Oliveira; OLIVEIRA, Rosane Maria Pessoa Betânio. As alternativas de aproveitamento do pó do alto-forno: uma revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693**, v. 12, 2020.

CLEARY, Paul W.; MORRISON, R. D. Comminution mechanisms, particle shape evolution and collision energy partitioning in tumbling mills. *Minerals Engineering*, v. 86, p. 75-95, 2016.

DA CUNHA JUNIOR, Adiel José Passos; COSTA, Dênis Carlos Lima; MACÊDO, Alcebíades Negrão. Análise sistemática da literatura sobre o uso do rejeito de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leves. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e12211527624-e12211527624, 2022.

DA SILVA, Cassio Roberto; DE AZEVEDO, Ricardo Guimarães. Recursos minerais do Brasil: Diretrizes para o setor mineral. **Terræ Didática**, v. 17, p. e021020-e021020, 2021.

DA SILVA, Cassio Roberto; DE AZEVEDO, Ricardo Guimarães. Recursos minerais do Brasil: Diretrizes para o setor mineral. **Terræ Didática**, v. 17, p. e021020-e021020, 2021.

DA SILVA, Larissa de Souza Vieira, TEIXEIRA, Roger Rodrigo Goetty; SANTANA, Ana Isabel de Carvalho; PINTO, Wilma Clemente de Lima; SANTOS, Shirleny Fontes.

Revisão sucinta sobre revestimento sol-gel anticorrosivo para aços. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 36283-36300, 2021.

DE AGUIAR, Felipe Leonardo. **Redução do impacto ambiental através da recuperação dos ultrafinos de minério de ferro: uma revisão**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

DE BRITO, Vera Lúcia Othéro Ferritas Ni-Zn: breve revisão sobre o processo convencional de fabricação e as propriedades permeabilidade magnética e constante dielétrica. **Cerâmica**, v. 52, p. 221-231, 2006.

DE CARVALHO, Mariana Xavier Sans. **Equipamentos de fragmentação: uma revisão avaliando circuitos alternativos para a moagem de finos**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

DE CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Rheology of high performance concretes applied in building site. **Cerâmica**, v. 57, p. 63-75, 2011.

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009.

DE FIGUEIREDO, Bárbara Queiroz, DE MORAIS, Álvaro Peixoto; BRITO, Ana Clara Viana Soares; Roehrs, Dieison Danrlei; CARNEIRO, Heitor Loborão; DE SOUSA, Isabele Gomes; NEGATA, Lorena Martins; SOUSA, Lunalva Gabrielli Veras; GOMES, Maria Jacilene de Araújo; ALVES, Melina Fonseca Maia França. Uso do grafeno e nióbio na prática médica: uma revisão narrativa de literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e57911125526-e57911125526, 2022.

DE MORAIS, Amanda Luiza Soares; MARTINS; Denize Aparecida; ANDRADE, Leticia Moronari; PEREIRA, Ragila Sabrina Fernandes; OLIVEIRA, Tiago Macel. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Journal of Exact Sciences**, v. 27, n. 1, 2021.

EVANS, Anthony M. Ore geology and industrial minerals: an introduction. John Wiley & Sons, 2009.

FARIA, Livia Vieira. **Briquete verde para reatores industriais de produção de ferro primário: revisão da literatura**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

FERNANDES, Daniella Rodrigues; EVANGELISTA, Breno Danho Veras; PINTO, Bianca Peres; ROCHA, Angela Sanches; DE ANDRADE, Débora França; REZENDE, Michelle Jakeline Cunha; MOTA, Cláudio José de Araújo. Panorama Geral da Utilização de Líquidos Iônicos para Fracionamento e Transformação da Biomassa Lignocelulósica. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 6, p. 1431-1456, 2021.

FERRARI, Vinicius Zortéa; TAVARES, André Carvalho; MARTINS, Vinicius; MALFATI, Célia de Fraga. Usinagem do nióbio comercialmente puro, uma revisão bibliográfica. **Brazilian Journal of development**, v. 7, n. 1, p. 1475-1494, 2021.

FERRAZZO, Suéllen Tonatto; BRAGAGNOLO, Lucimara; KORF, Eduardo Pavan. Caracterização tecnológica e reaproveitamento de resíduos de magnetita em misturas asfálticas e em concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)**, n. 54, p. 69-89, 2019.

FERRAZZO, Suéllen Tonatto; BRAGAGNOLO, Lucimara; KORF, Eduardo Pavan. Caracterização tecnológica e reaproveitamento de resíduos de magnetita em misturas asfálticas e em concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)**, n. 54, p. 69-89, 2019.

FERREIRA, Davi Nascimento; SIMONELLI, George; DOS SANTOS, Luiz Carlos Lobato. Mecanismos de deposição de parafinas para aplicação em modelos: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e226985154-e226985154, 2020.

FRANZ, M. Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1809-1818, 2008.

GOMES, Ana Cláudia Franca; SANTOS, André Luiz Alvarenga; MOREIRA, Rafael Marques; PAPINI, Risia Magriotis. Uma revisão da recuperação de minérios de ferro ultrafinos dispostos em barragens de rejeitos brasileiras. **Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales**, 2018.

GOMES, Gabriel da Silva; DO VALE, Silvio Bispo; PIKANÇO, Marcelo de Souza. Geopolímeros e sua potencial aplicação na imobilização de metais pesados: Uma década de revisão. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 9, p. e12212943233-e12212943233, 2023.

GOOSSENS, Marcos; RIBEIRO, Magno Rodrigues; MOURA, Gláucia Ellen de. ALTERNATIVAS DE CIRCUITOS DE MOAGEM PARA PELOTIZAÇÃO. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 1, n. 2, p. 1-4, 2013.

GUERRA, Vanderlei Ricardo; TREVISAN, Lisiane. Processos de reciclagem de metal duro: uma revisão. **Revista Liberato**, v. 21, n. 35, p. 39-56, 2020.

GUIMARÃES, M. E.; SOUZA, R. O. Ligantes asfálticos modificados com resíduos: uma revisão de literatura. **1º Simpósio de Transportes do Paraná 2º Seminários em Aeroportos e Transporte Aéreo 2º Urbanidade Livro de resumos e trabalhos completos**, p. 141, 2018.

KINNARINEN, Teemu; GOLMAEI, Mohammad; JERNSTRÖM, Eeva; HÄKKINEN, Antti. Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 953-964, 2016.

LANARO FILHO, Pedro; BÖHME, Maria Tereza Silveira. Detecção, seleção e promoção de talentos esportivos em ginástica rítmica desportiva: um estudo de revisão. **Revista paulista de educação física**, v. 15, n. 2, p. 154-168, 2001.

LIMA, Fernanda Silva; DA SILVA FILHO, Wilson Seraine. Potencial Uranífero no Brasil: uma revisão bibliográfica Uranific potential in Brazil: a bibliographic review. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 58852-58867, 2021.

LIMA, Júnior; ABREU, F. O. M. S. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, 2018.

LOPES, Osmando F.; DE MENDONÇA, Vagner R.; SILVA, Fernando B. F.; PARIS, Elaine C.; RIBEIRO, Caue. Óxidos de nióbio: uma visão sobre a síntese do Nb₂O₅ e sua aplicação em fotocatalise heterogênea. **Química Nova**, v. 38, p. 106-117, 2015.

MAEDA, Jaqueline Midori Makiyama. Estudo de caracterização mineral e de reagentes na flotação de minério de ferro. **Universidade de São Paulo**, 2014.

MANZANO, Manuel Alejandro Rojas; DA SILVA, Eugênia Fonseca; LOPES, Anne Neiry de Mendonça; FILHO-TOLÊDO, Romildo Dias. Mecanismo de atuação dos Polímeros Superabsorventes como agentes de cura interna para mitigar a retração autógena em Concretos de Alta Resistência (CAR) – Estado da Arte. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.

MARTINS, Manuel A.; TRINDADE, Tito. Os nanomateriais e a descoberta de novos mundos na bancada do químico. **Química nova**, v. 35, p. 1434-1446, 2012.

MARTINS, S. C.; SOARES, APM; VIANA, PRM. Flotação de wollastonita—uma revisão. In: **XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology**. p. 203-210, 2013.

MASSIGNAN, Rafaela Shinobe; SÁNCHEZ, Luis Enrique. O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 225-234, 2022.

MENDES, Marcos Vinicius Agapito; DA SILVA, Guilherme Sousa Rosa; GOMES, Lucas Chagas; SIQUEIRA, Lucas Aquilas; SILVA, Gabriel Gomes; PEREIRA, Paulo Elias Carneiro. Revisão sistemática: separação magnética no processamento mineral. **Holos**, v. 4, p. 1-15, 2021.

MOREIRA, Fátima R.; MOREIRA, Josino C. A importância da análise de especiação do chumbo em plasma para a avaliação dos riscos à saúde. **Química Nova**, v. 27, p. 251-260, 2004.

MOREIRA, Fátima R.; MOREIRA, Josino C. A importância da análise de especiação do chumbo em plasma para a avaliação dos riscos à saúde. **Química Nova**, v. 27, p. 251-260, 2004.

NASCIMENTO, Damares da Cruz Barbosa; ROSA, Diemison, Lira Santa; SOARES, Edson Miranda; NEVES, Alacid Socorro Siqueira; PAULA, Marcos Vinicius da Silva. Características mineralógicas e aplicações do minério de ferro oriundo da província

mineral de Carajás: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e59811730254-e59811730254, 2022.

NAVARRO, Juliano L.; LOPES, Leonardo A.; SILVA, André P.; DIAS, Márcio J.; BRANDÃO, Sérgio M.; RODRIGUES, Rosemberg F. N. Revisão Sistemática sobre Alternativas de Reciclagem de Alumínio e suas Ligas. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 28, p. 174-188, 2020.

NGUYEN, Cuong V.; NGUYEN, Anh V.; DOI, Andrew; DINH, Emma; NGUYEN, Thoung V.; EJTEMAEI, Majid; OSBORNE, Dave. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. **Separation and Purification Technology**, v. 259, p. 118172, 2021.

NONATO, Carlos Tavares; DE ABREU, Yolanda Vieira. Desenvolvimento de modelos de classificação de florestas plantadas para planejamento e tomada de decisão: Mineração de Dados e Imagens de Satélite. Life editora, 2020.

NUNES, José Gustavo da Silva; UAGODA, Rogério. Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 487-509, 2020.

NUNES, Mariana Rodrigues. **Revisão bibliográfica e crítica sobre os depósitos sedimentares recentes do Quadrilátero Ferrífero**. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

OLIVEIRA, Kaio Júnior Pinheiro; VIANA, Matheus Luque; RODRIGUEIRO, Mariana Matulovic da Silva; MOLLO-NETO, Mario; OLIVEIRA, Kassandra Sussi Mastafé; MORAIS; Flávio José de Oliveira; FLORINDO; Débora Nathália Fernandes; GABRIEL-FILHO, Luís Roberto Almeida; BRAGA-JUNIOR, Sérgio Silva; DOS SANTOS, Paulo Sérgio. Utilização de resíduos na alimentação das larvas de moscas soldado negro (*hermetia illucens*): revisão sistemática da literatura. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 4, n. 5, p. e452989-e452989, 2023.

ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; DE SOUZA, D. P. F. Aspectos da reologia e da estabilidade de suspensões cerâmicas. Parte III:

mecanismo de estabilização eletroestérica de suspensões com alumina. **Cerâmica**, v. 43, p. 113-119, 1997.

ÖTZE, Jens; GÖBBELS, Matthias. Inorganic Non-metallic Raw Materials. In: Introduction to Applied Mineralogy. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023.

PEGORARO, Guilherme Manassés; ALVES, Lucas Repecka; CARRIELLO, Giovanni Miraveti; MAMBINI, Giovanni Pimenta; REZENDE, Maira de Loudes; DE MENEZES, Aparecido Junior. Polyurethane and rare-earth materials: a review. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 9, n. 3, p. 15627-01e, 2023.

PENNA, Isabela Costa; MARTINS, Tarcísio Santos; DA SILVEIRA, João Vinícios Wirbitzki. Fibras Eletrofiadas Aplicadas na Remoção de Metais Pesados em Águas Residuárias da Mineração: uma Revisão Sistemática. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, 2022.

PEREIRA, Ana Larisse Carneiro; DE MIRANDA, Larissa Mendonça; TROCONIS, Cristian Camilo Madrid; BARÃO, Valentim Adelino Ricardo; CARREIRO, Adriana da Fonte Porto. Qual o tratamento da superfície do metal melhora a resistência de união entre ligas metálicas e resina acrílica em ppr? Uma revisão sistemática. **Brazilian Journal of Case Reports**, v. 3, n. Suppl. 8, p. 62-62, 2023.

PEREIRA, Jéssica Neiva; COSTA, Leandro de Vilhena. Análise das melhorias obtidas com a implantação de um circuito gravimétrico em uma planta concentradora de ouro. **Humanidades e tecnologia (FINOM)**, v. 22, n. 1, p. 253-273, 2020.

PULZ, Gênova Maria; CUNHA, Maria Do Carmo Lima E.; FORMOSO, Milton Laquintinie. Revisão Sobre a Geoquímica do Berílio nos Materiais Naturais. **Pesquisas em Geociências**, v. 25, n. 2, p. 29-40, 1998.

RAHMONOV, Oimahmad; CABAŁA, Jerzy; KRZYSZTOFIK, Robert. Vegetation and environmental changes on contaminated soil formed on waste from an historic Zn-Pb ore-washing plant. **Biology**, v. 10, n. 12, p. 1242, 2021.

RENNER, Sven; WELLMER, Friedrich W. Volatility drivers on the metal market and exposure of producing countries. **Mineral Economics**, v. 33, n. 3, p. 311-340, 2020.

ROCHA, P. A. C.; SANTOS, R. F. D. M.; LIMA, R. J. P.; DA SILVA, M. E. V. A review on nanofluids: preparation methods and applications. **Periodico Tche Quimica**, v. 16, n. 31, p. 365-380, 2019.

ROCHA, Paulo Alexandre Costa; DA SILVA, Maria Eugênia Vieira. UMA REVISÃO SOBRE NANOFLUIDOS: MÉTODOS DE PREPARAÇÃO E APLICAÇÕES. **Periódico Tchê Química**, v. 16, n. 31, 2019.

ROCHA, Vanessa Vilela; HORTA, Ricardo Augusto dos Santos; DE PAULA, Júnia Nunes; LUDVING, Péter. Revisão teórica sobre o potencial da adição do óxido de grafeno em materiais cimentícios. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.

ROQUE, Jonathan Simões; CASAGRANDE, César Augusto; JOCHEM, Lidiane Fernanda. Aplicação da escória de cobre em matrizes cimentícias: Uma revisão sistemática. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, v. 7, n. 2, 2022.

ROSIÈRE, Carlos A.; CHEMALE JR, Farid. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. **Geonomos**, 2000.

ROVERI, Eduardo; CHAVES, Arthur Pinto. MECHANISMS OF CHARGE WEAR IN BALL MILLS. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 8, n. 4, 2011.

ROVERI, Eduardo; CHAVES, Arthur Pinto. MECHANISMS OF CHARGE WEAR IN BALL MILLS. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 8, n. 4, 2011.

SCARPELLI, Wilson; HORIKAVA, Élio Hiromi. Gold, iron and manganese in central Amapá, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, p. 703-721, 2017.

SCHAFFAZICK, Scheila Rezende; GUTERRES, Sílvia Stanisçuaski; FREITAS, Liane de Lucca; POHLMANN, Adriana Raffin. Caracterização e estabilidade físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administração de fármacos. **Química nova**, v. 26, p. 726-737, 2003.

SHINZATO, Mirian Chieko. Remoção de metais pesados em solução por zeólitas naturais: revisão crítica. **Revista do Instituto Geológico (Descontinuada)**, p. 65-78, 2007.

SILVA, José Dilson F.; DA SILVA, Yara; PIATNICKI, Clarisse M. S.; BÖCKEL, Wolmir José; MENDONÇA, Carla R. B. Microemulsões: componentes, características, potencialidades em química de alimentos e outras aplicações. **Química Nova**, v. 38, p. 1196-1206, 2015.

SILVA, Luciana A.; VICTOR, Mauricio M.; LOPES, Wilson Araujo; CUNHA, Silvio. Cobre: produção industrial e aplicações. **Química Nova**, v. 42, p. 1154-1161, 2020.

SILVA, Marcela Fernandes; PINEDA, Edgardo Alfonso Gómez; BERGAMASCO, Rosangela. Aplicação de óxidos de ferro nanoestruturados como adsorventes e fotocatalisadores na remoção de poluentes de águas residuais. **Química Nova**, v. 38, p. 393-398, 2015.

SILVA, Priscila Pereira; Guerra, Wendell. Rutênio. **Química nova na escola**, v. 34, n. 2, p. 99-100, 2012.

SOUSA FILHO, Paulo C. de; SERRA, Osvaldo A. Metodologias de síntese em fase líquida para a obtenção de nanomateriais inorgânicos à base de Terras Raras. **Química Nova**, v. 38, p. 679-696, 2015.

SOUZA, Karynne Cristina de; MOHALLEM, Nelcy Della Santina; DE SOUSA, Edésia Martins Barros. Nanocompósitos magnéticos: potencialidades de aplicações em biomedicina. **Química Nova**, v. 34, p. 1692-1703, 2011.

SPITZ, Karlheinz; TRUDINGER, John. Mining and the environment: from ore to metal. CRC Press, 2019.

STELA, Luis Henrique; DUARTE, Juliana Canto; PEREIRA, Camila Ortulan. Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de barragens: uma revisão. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, v. 1, n. 1, p. 34-45, 2020.

TARLETON, Steve; WAKEMAN, Richard. Solid/liquid separation: equipment selection and process design. Elsevier, 2006.

TOTOU, Adriano Raimundo; PEREIRA, Carlos Alberto; MACHADO, Philippe Gonçalves Fernandes; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. Efeito da dispersão em

polpas de minérios itabirfíticos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, p. 227-232, 2011.

TRENKENSCHUH, Eduard; FRIESS, Wolfgang. Freeze-drying of nanoparticles: How to overcome colloidal instability by formulation and process optimization. **European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics**, v. 165, p. 345-360, 2021.

VERSIANI, Flávio R.; SUZIGAN, Wilson. O processo brasileiro de industrialização: uma visão geral. In: **Congresso Internacional de História Econômica**. 1990.

VIANA, P. R. M.; ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C.; SALUM, M. J. G. Concentração de silicatos de lítio-uma revisão. **XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, p. 325-332, 2004.

VIERA, Elbert Valdiviezo; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1997.

WAKEMAN, Richard. The influence of particle properties on filtration. **Separation and Purification Technology**, v. 58, n. 2, p. 234-241, 2007.

WELLENKAMP, Franz-Josef. Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão. Rio de Janeiro: CETEM, 1999. (Série Tecnologia Mineral, 75).

ZUÑIGA, Abraham Damian Giraldo; PAULA, Marcielle Martins; COIMBRA, Jane Selia dos Reis; MARINS, Elaine Cristina Alves; SILVA, Donizete Xavier da; TELIS-ROMERO, Javier. Revisão: propriedades físico-químicas do biodiesel. **Pesticidas**, p. 55-72, 2011.

ANEXO 1

Resumo da análise mineralógica

Análise química

Análise Química (%)

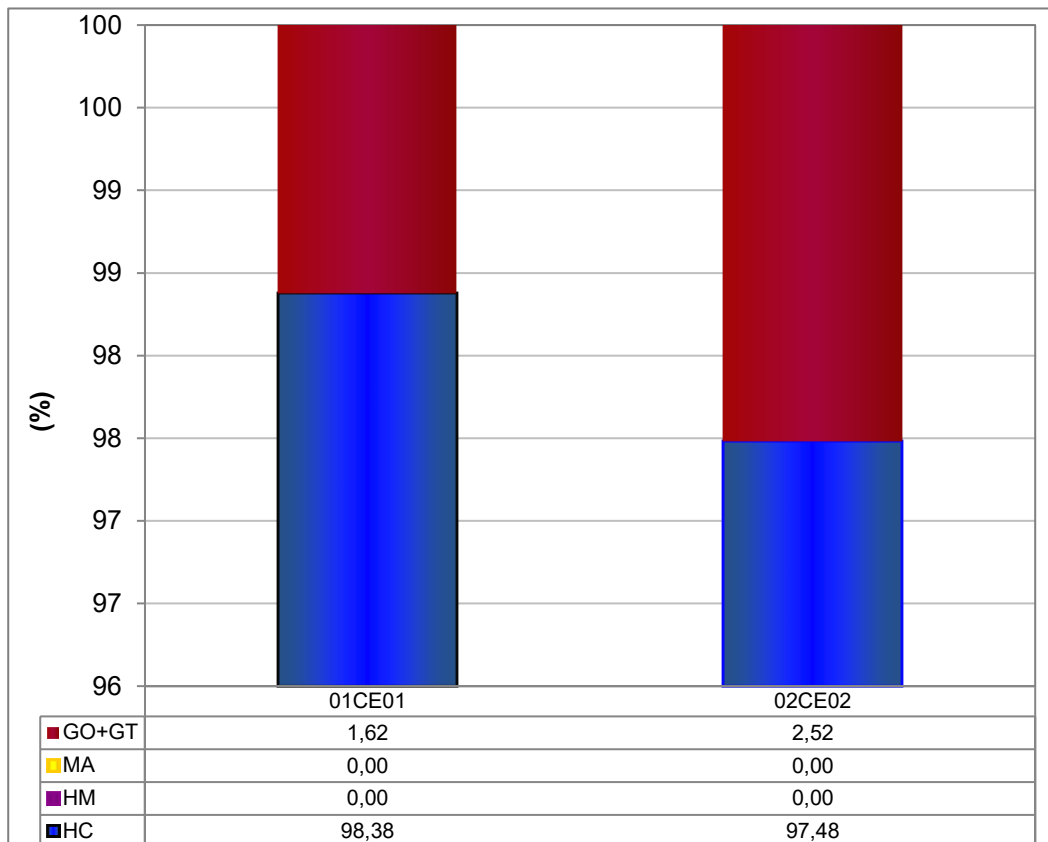
Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
40,38	40,28	0,013	0,63	0,038	0,051	0,010	0,038	0,44
34,40	44,55	0,086	3,93	0,210	0,037	0,111	0,447	2,08

Distribuição das Hematitas

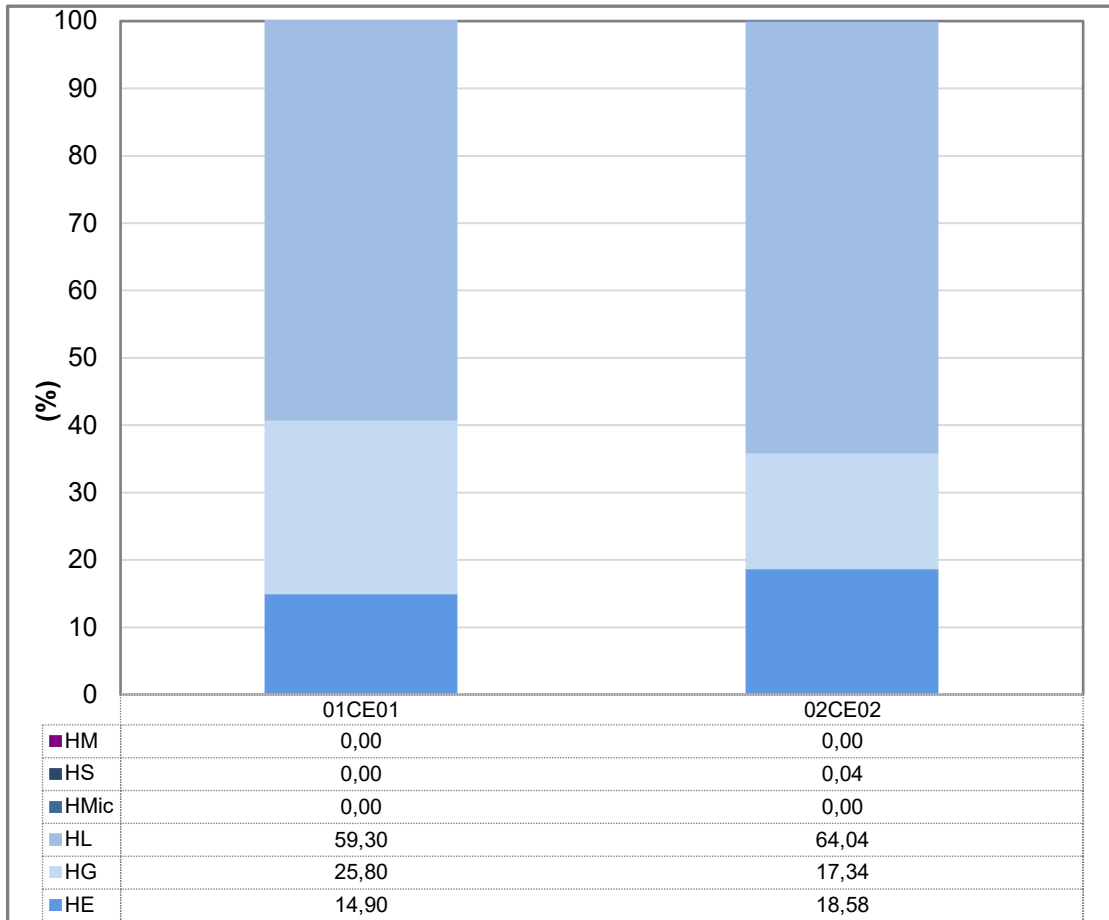
Distribuição das Hematitas (%)

HE	HL	HG	HMic	HS	HC	HM
14,90	59,30	25,80	0,00	0,00	100,00	0,00
18,58	64,04	17,34	0,00	0,04	100,00	0,00

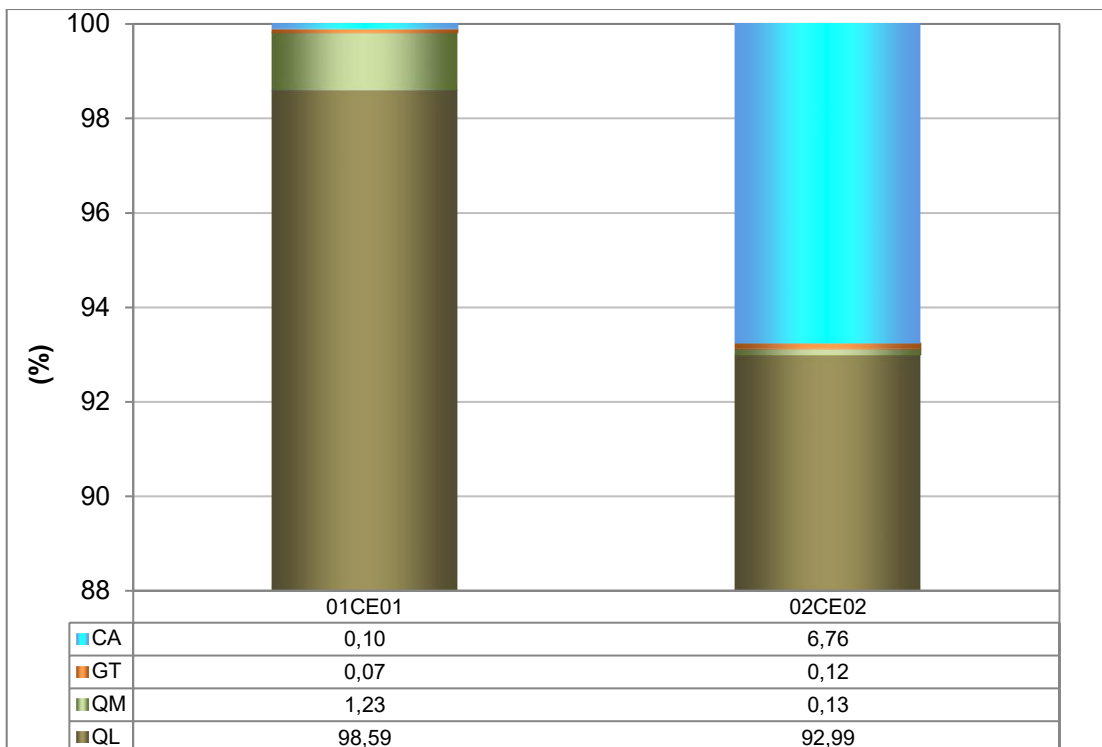
Distribuição dos Minerais Ferruginos

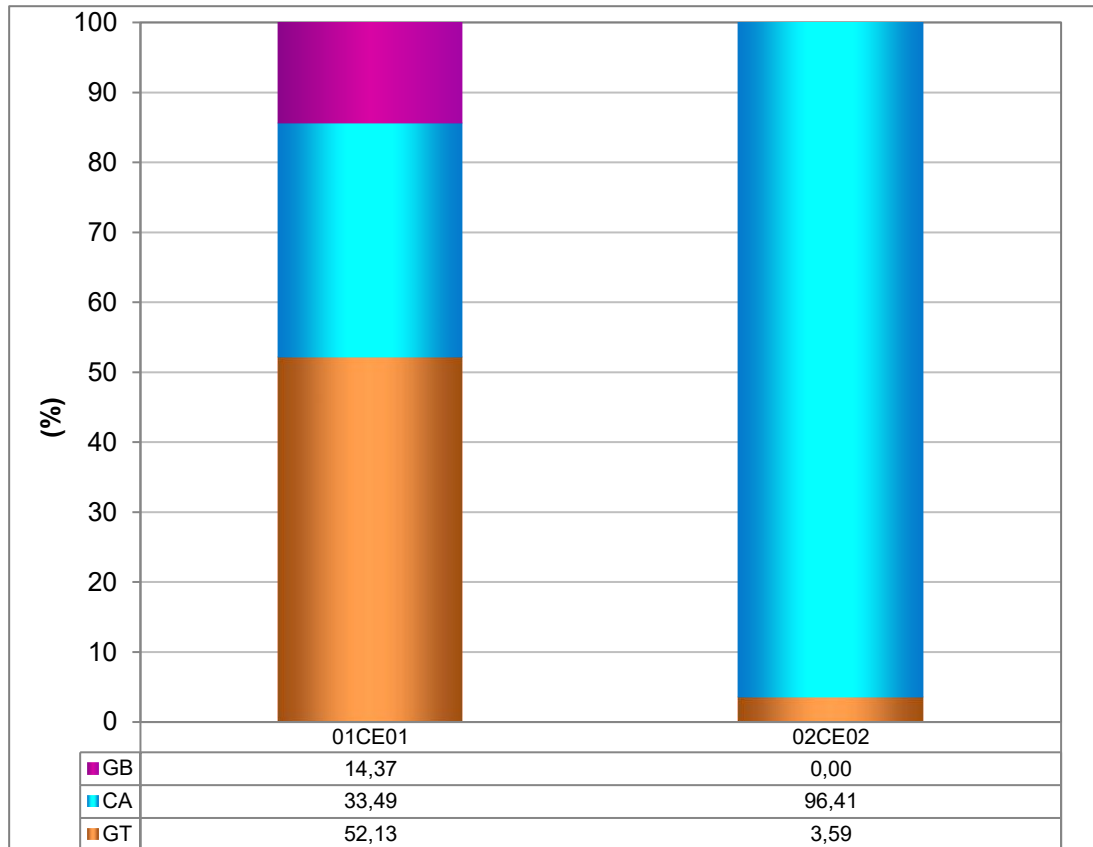


Distribuição das hematitas



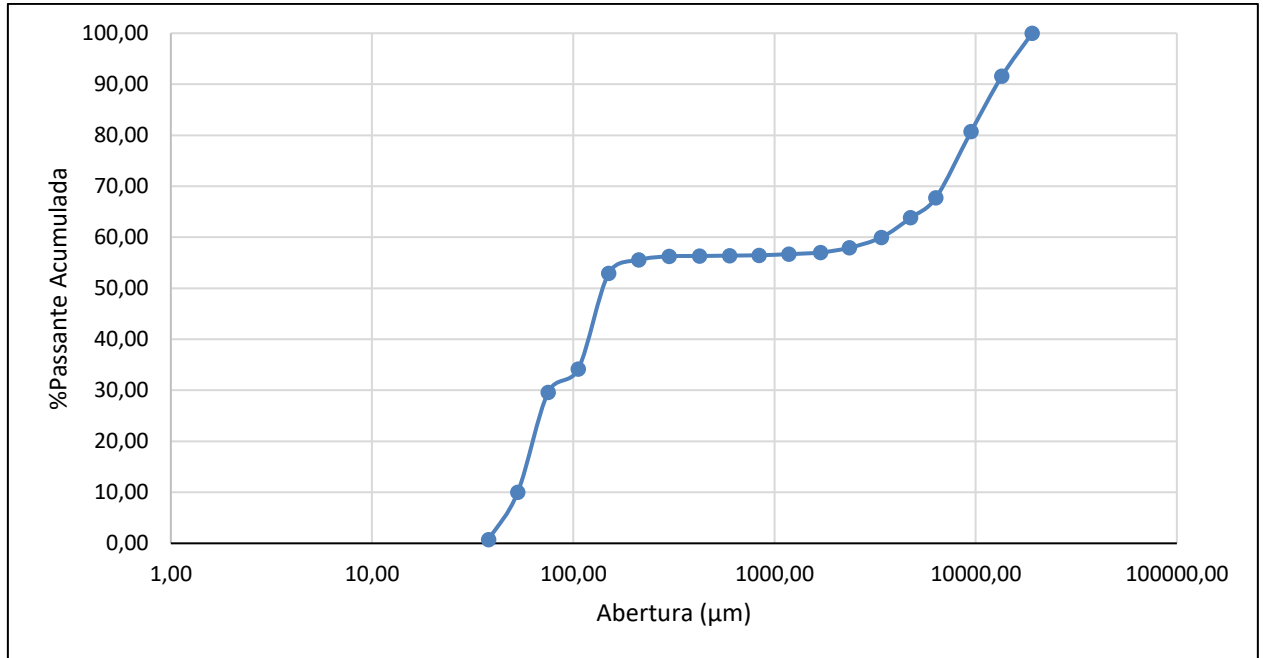
Distribuição da sílica por mineral



Distribuição da alumina por mineral

ANEXO 2

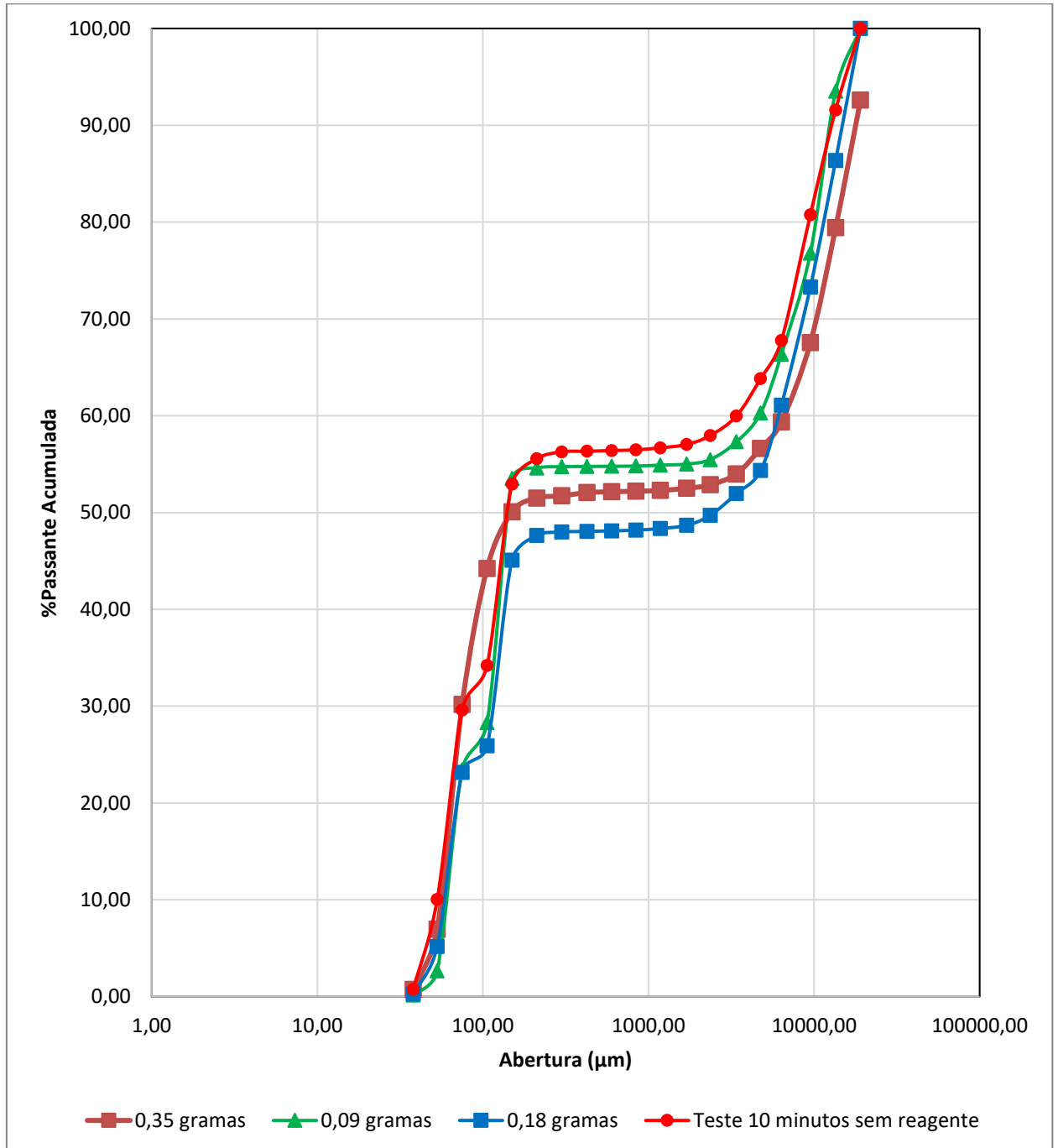
Teste de 10 minutos sem reagente



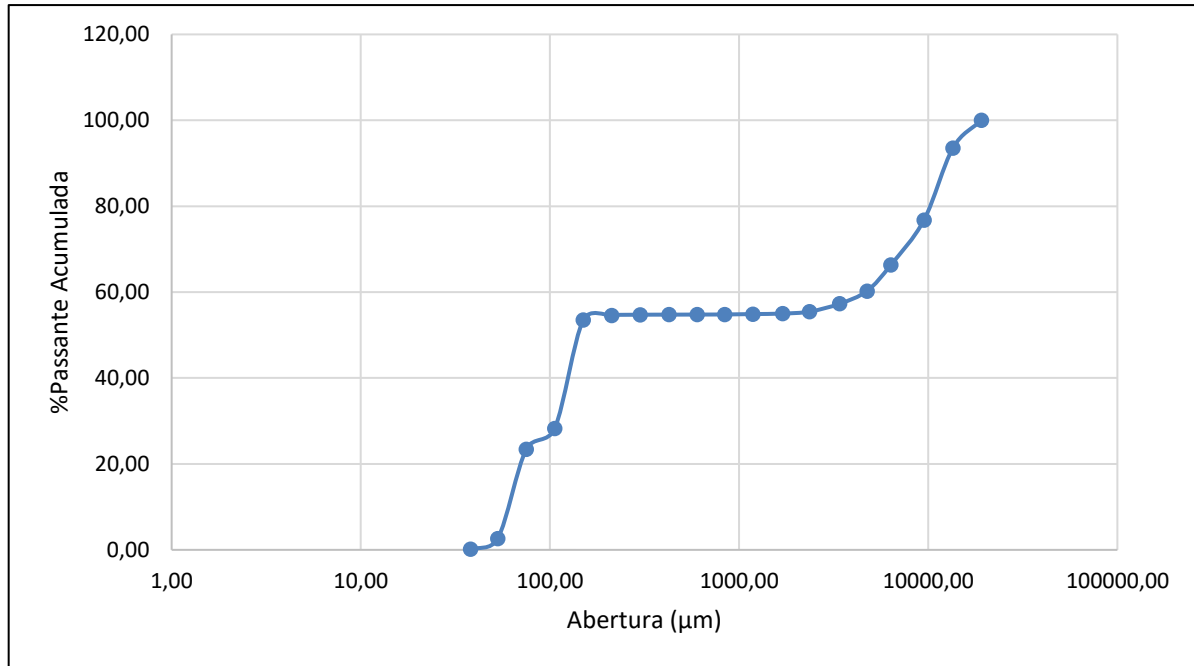
Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	58,36	8,41	8,41	91,59
9500,00	75,14	10,83	19,25	80,75
6350,00	90,15	13,00	32,24	67,76
4750,00	27,31	3,94	36,18	63,82
3400,00	26,71	3,85	40,03	59,97
2360,00	13,97	2,01	42,04	57,96
1700,00	6,42	0,93	42,97	57,03
1180,00	2,39	0,34	43,31	56,69
840,00	1,45	0,21	43,52	56,48
600,00	0,51	0,07	43,60	56,40
425,00	0,51	0,07	43,67	56,33
300,00	0,46	0,07	43,73	56,27
212,00	4,93	0,71	44,45	55,55
150,00	18,14	2,62	47,06	52,94
106,00	129,97	18,74	65,80	34,20
75,00	31,94	4,60	70,40	29,60
53,00	135,69	19,56	89,96	10,04
38,00	64,36	9,28	99,24	0,76
-38,00	5,27	0,76	100,00	0,00
Total	693,68	100,00		

Curvas granulométricas comparativas individuais

CADM22-369 – Comparativo Geral

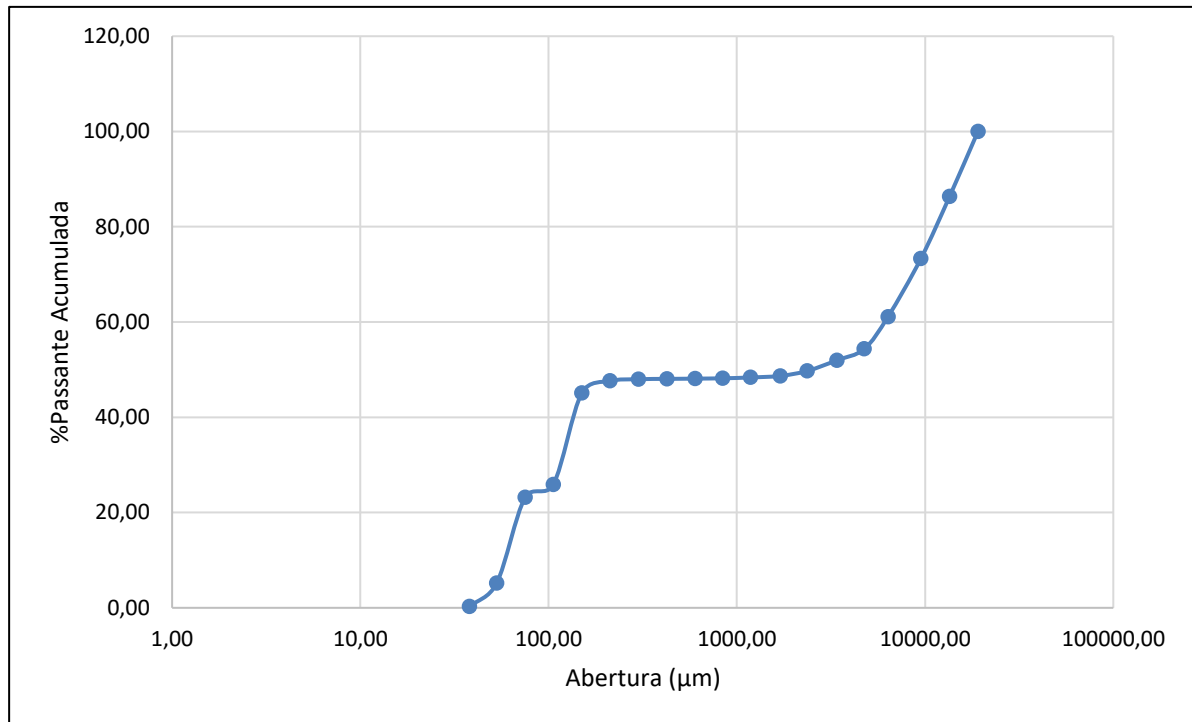


0,09 gramas CADM22-369 (50g/t)



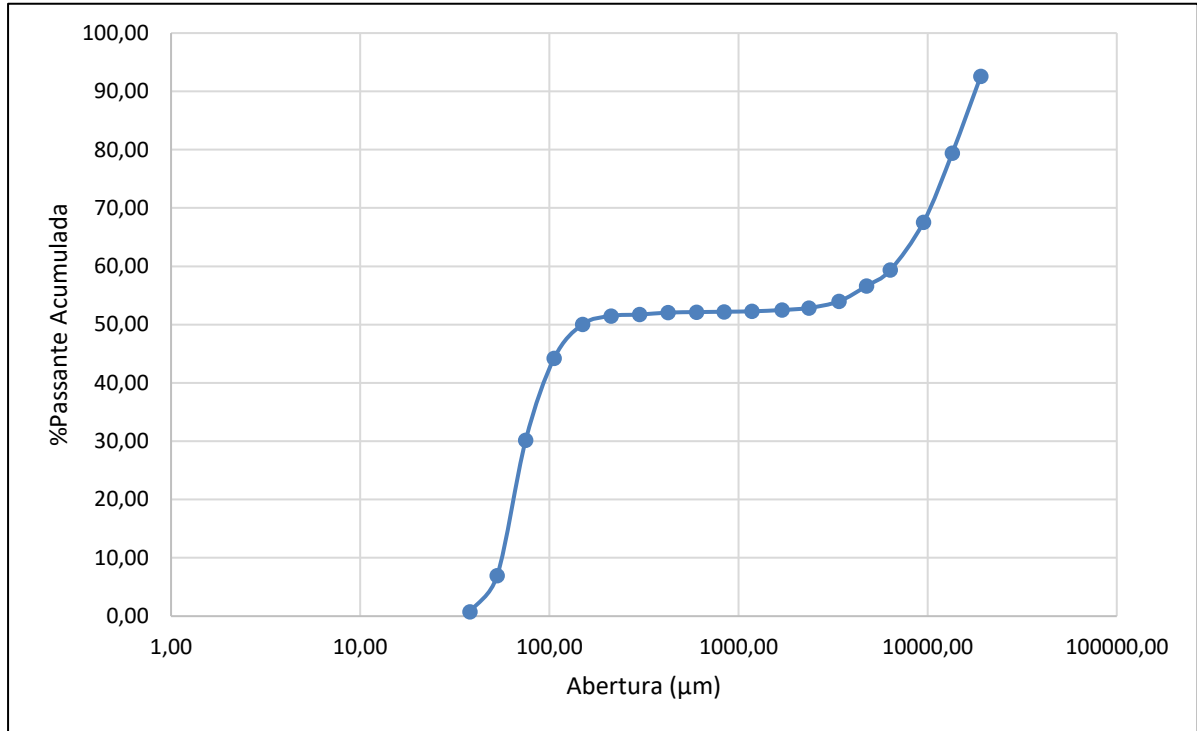
Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	42,78	6,47	6,47	93,53
9500,00	110,62	16,74	23,21	76,79
6350,00	68,98	10,44	33,64	66,36
4750,00	40,25	6,09	39,73	60,27
3400,00	19,60	2,97	42,70	57,30
2360,00	12,13	1,84	44,53	55,47
1700,00	3,02	0,46	44,99	55,01
1180,00	0,74	0,11	45,10	54,90
840,00	0,63	0,10	45,20	54,80
600,00	0,14	0,02	45,22	54,78
425,00	0,16	0,02	45,24	54,76
300,00	0,12	0,02	45,26	54,74
212,00	0,93	0,14	45,40	54,60
150,00	7,23	1,09	46,50	53,50
106,00	166,71	25,22	71,72	28,28
75,00	31,95	4,83	76,55	23,45
53,00	137,48	20,80	97,35	2,65
38,00	16,49	2,49	99,84	0,16
-38,00	1,03	0,16	100,00	0,00
Total	660,99	100,00		

0,18 gramas CADM22-369 (100g/t)



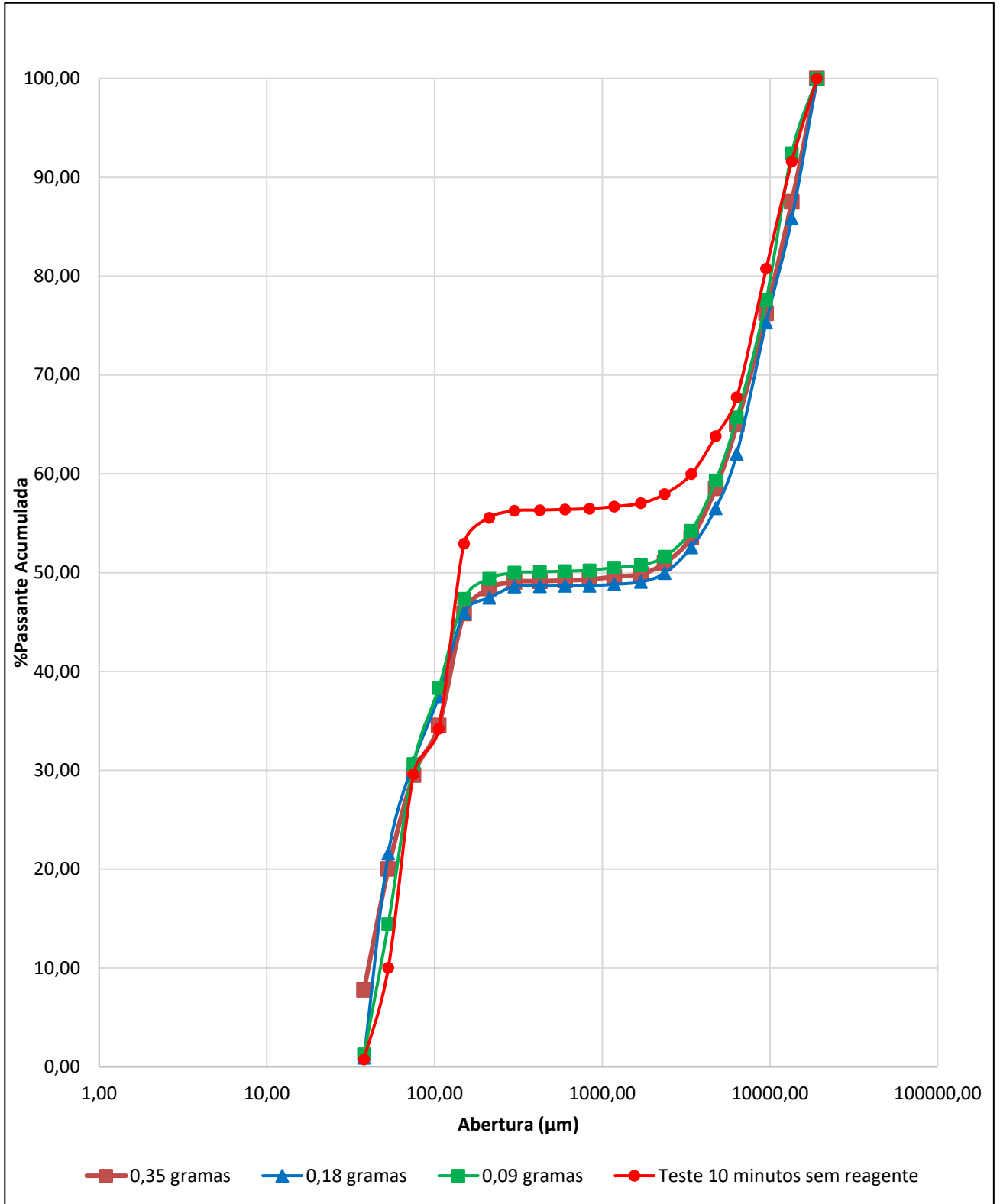
Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	99,64	13,64	13,64	86,36
9500,00	95,44	13,06	26,70	73,30
6350,00	89,21	12,21	38,91	61,09
4750,00	49,34	6,75	45,66	54,34
3400,00	17,35	2,37	48,04	51,96
2360,00	16,41	2,25	50,28	49,72
1700,00	7,56	1,03	51,32	48,68
1180,00	2,37	0,32	51,64	48,36
840,00	1,26	0,17	51,82	48,18
600,00	0,52	0,07	51,89	48,11
425,00	0,40	0,05	51,94	48,06
300,00	0,50	0,07	52,01	47,99
212,00	2,71	0,37	52,38	47,62
150,00	18,57	2,54	54,92	45,08
106,00	140,15	19,18	74,10	25,90
75,00	20,05	2,74	76,85	23,15
53,00	131,26	17,97	94,81	5,19
38,00	35,86	4,91	99,72	0,28
-38,00	2,03	0,28	100,00	0,00
Total	730,63	100,00		

0,35 gramas CADM22-369 (200g/T)

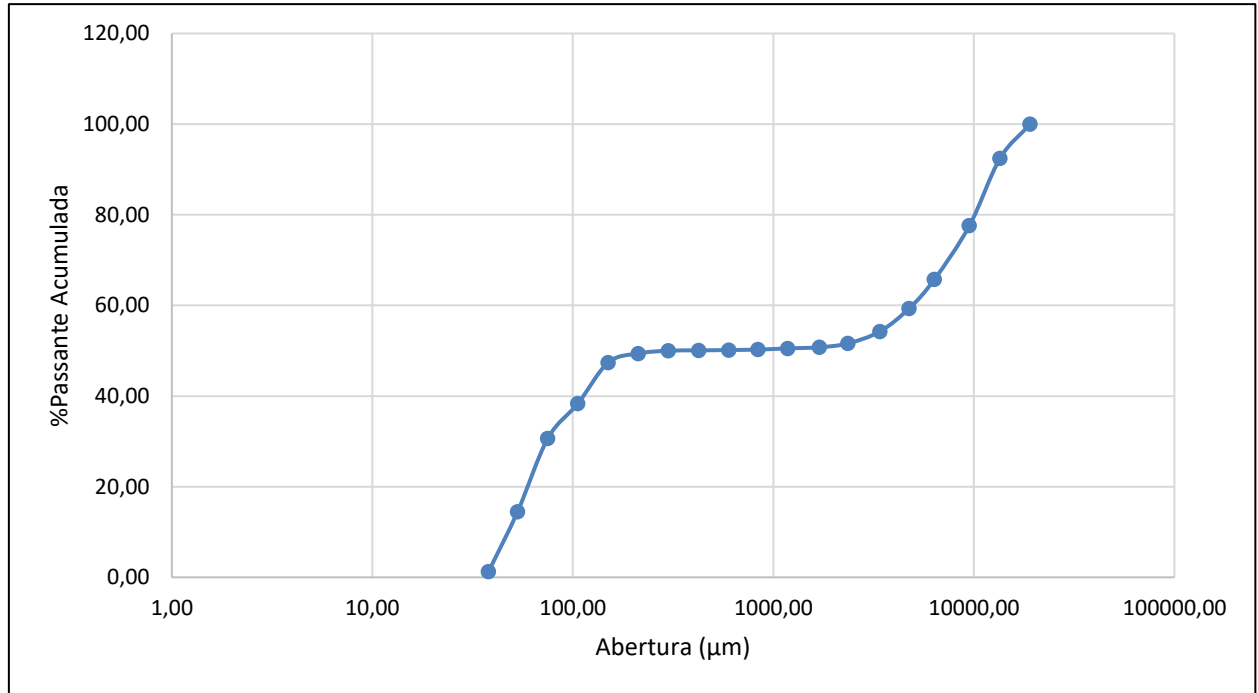


Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	56,35	7,39	7,39	92,61
13500,00	100,52	13,19	20,58	79,42
9500,00	90,55	11,88	32,46	67,54
6350,00	62,40	8,19	40,65	59,35
4750,00	20,80	2,73	43,38	56,62
3400,00	20,03	2,63	46,00	54,00
2360,00	8,60	1,13	47,13	52,87
1700,00	2,75	0,36	47,49	52,51
1180,00	1,71	0,22	47,72	52,28
840,00	0,56	0,07	47,79	52,21
600,00	0,47	0,06	47,85	52,15
425,00	0,64	0,08	47,94	52,06
300,00	2,59	0,34	48,28	51,72
212,00	1,78	0,23	48,51	51,49
150,00	10,89	1,43	49,94	50,06
106,00	44,48	5,84	55,77	44,23
75,00	106,95	14,03	69,81	30,19
53,00	177,10	23,24	93,04	6,96
38,00	47,34	6,21	99,25	0,75
-38,00	5,70	0,75	100,00	0,00
Total	762,21	100,00		

CADM22-370 – Comparativo Geral

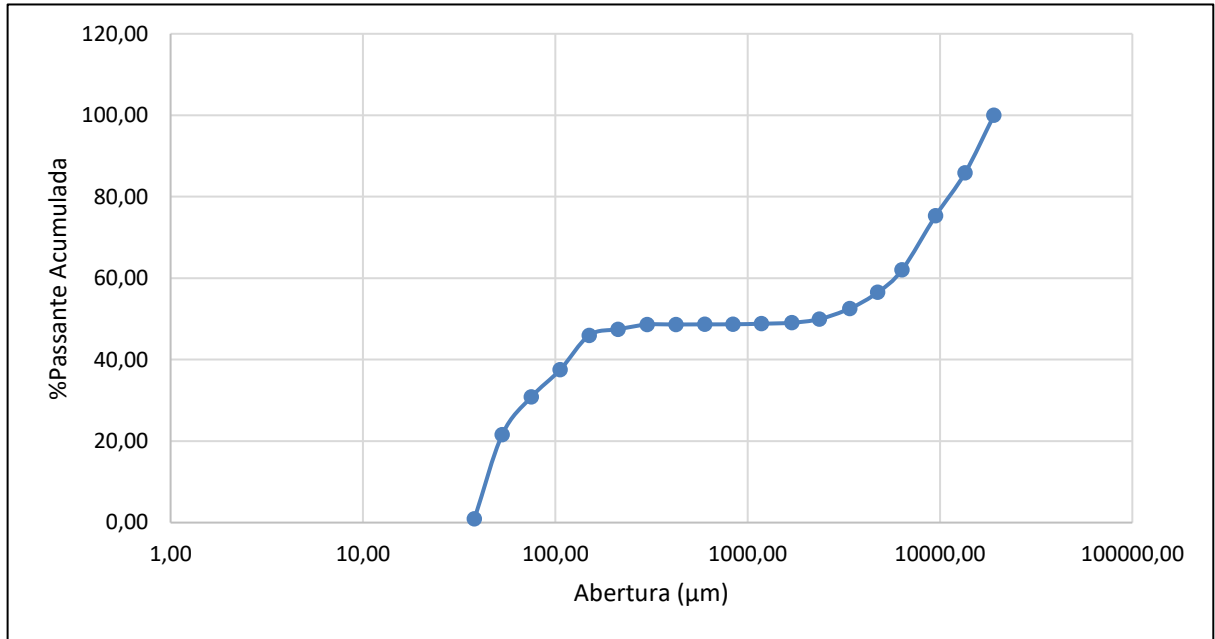


0,09 gramas CADM22-370 (50g/T)



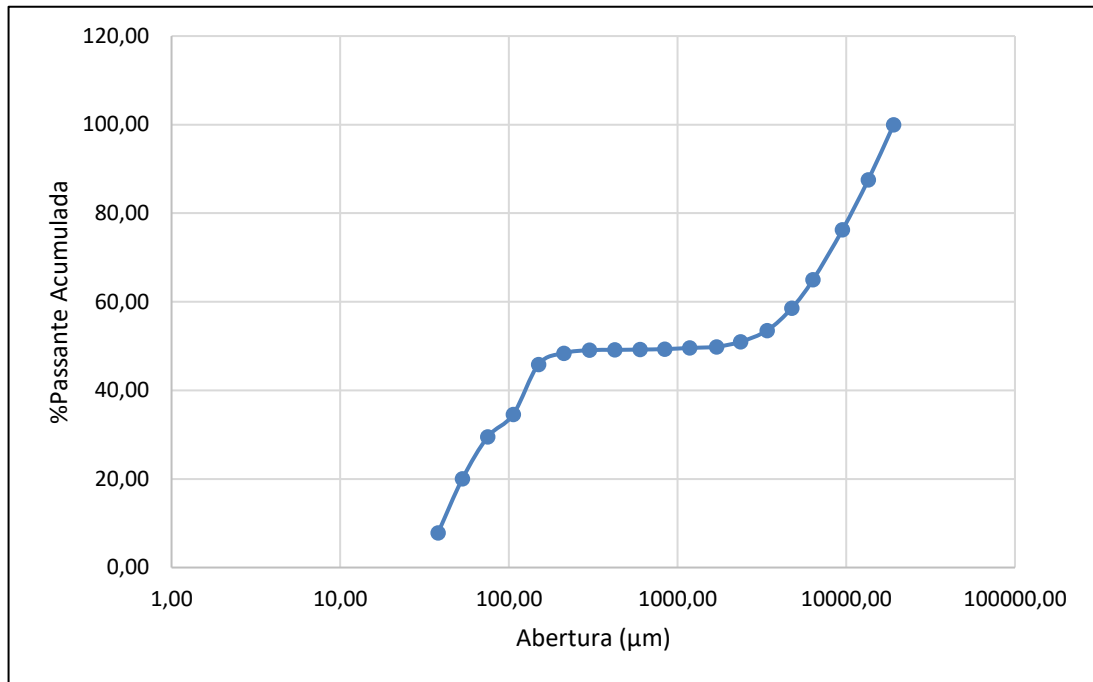
Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	57,61	7,56	7,56	92,44
9500,00	113,19	14,86	22,42	77,58
6350,00	90,46	11,87	34,29	65,71
4750,00	48,78	6,40	40,69	59,31
3400,00	38,56	5,06	45,75	54,25
2360,00	19,99	2,62	48,37	51,63
1700,00	6,59	0,86	49,24	50,76
1180,00	1,86	0,24	49,48	50,52
840,00	2,06	0,27	49,75	50,25
600,00	0,70	0,09	49,85	50,15
425,00	0,59	0,08	49,92	50,08
300,00	0,56	0,07	50,00	50,00
212,00	4,65	0,61	50,61	49,39
150,00	15,36	2,02	52,62	47,38
106,00	68,83	9,03	61,66	38,34
75,00	58,62	7,69	69,35	30,65
53,00	123,20	16,17	85,52	14,48
38,00	100,61	13,20	98,72	1,28
-38,00	9,73	1,28	100,00	0,00
Total	761,95	100,00		

0,18 gramas CADM22-370 (100g/t)

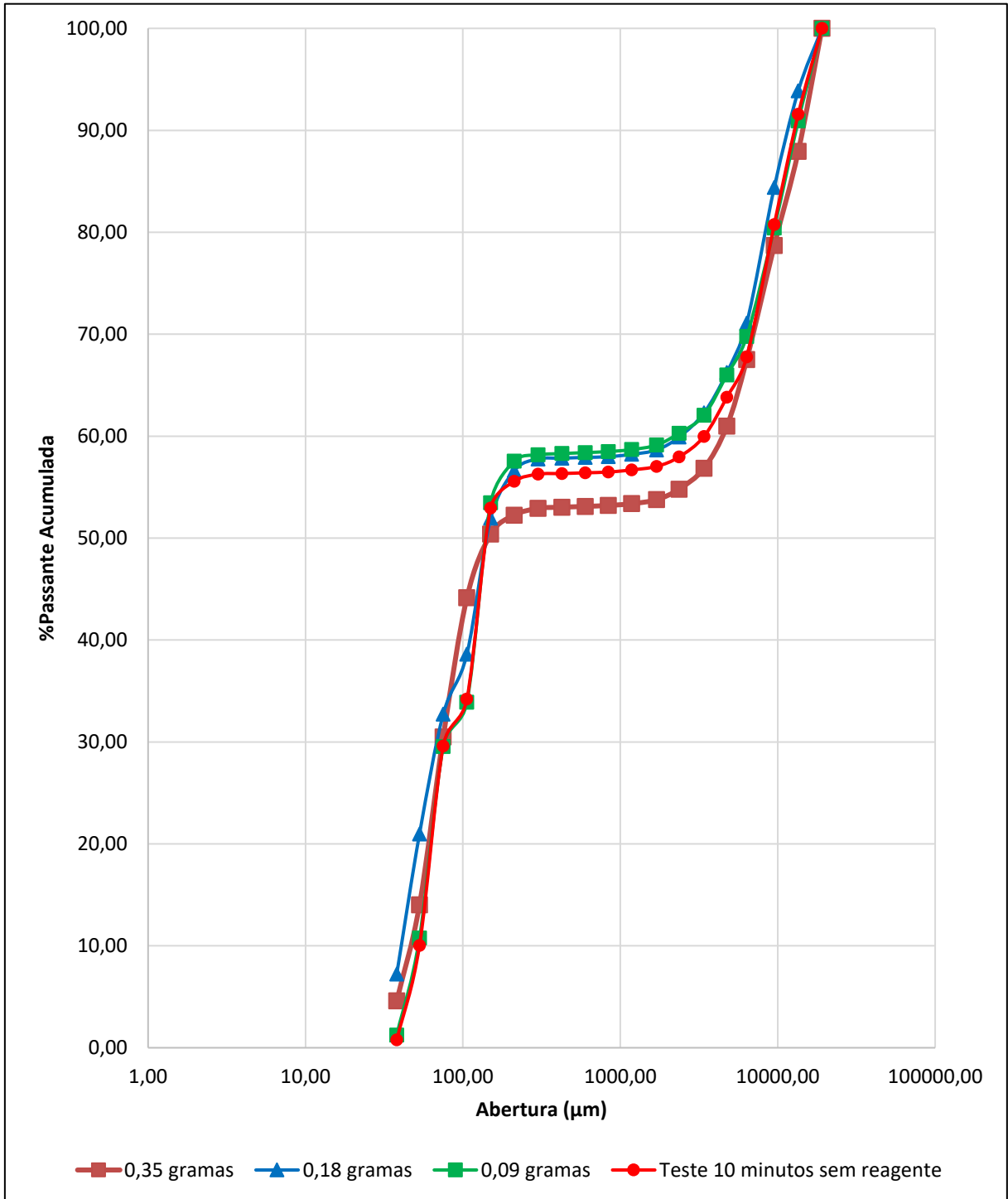


Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	107,73	14,16	14,16	85,84
9500,00	79,93	10,51	24,67	75,33
6350,00	101,09	13,29	37,96	62,04
4750,00	41,94	5,51	43,48	56,52
3400,00	30,10	3,96	47,44	52,56
2360,00	19,81	2,60	50,04	49,96
1700,00	6,75	0,89	50,93	49,07
1180,00	1,92	0,25	51,18	48,82
840,00	1,01	0,13	51,31	48,69
600,00	0,15	0,02	51,33	48,67
425,00	0,25	0,03	51,37	48,63
300,00	0,18	0,02	51,39	48,61
212,00	8,78	1,15	52,54	47,46
150,00	11,33	1,49	54,03	45,97
106,00	64,34	8,46	62,49	37,51
75,00	50,78	6,68	69,17	30,83
53,00	70,24	9,24	78,40	21,60
38,00	157,23	20,67	99,08	0,92
-38,00	7,02	0,92	100,00	0,00
Total	760,58	100,00		

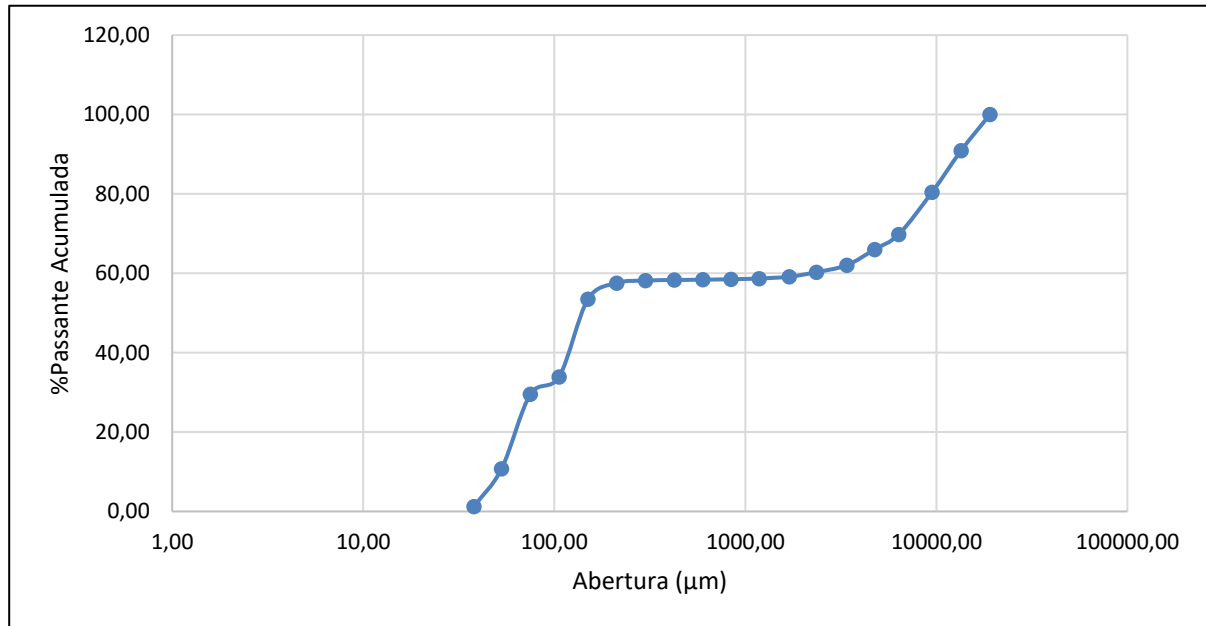
0,35 gramas CADM22-370 (200g/t)



Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	89,14	12,47	12,47	87,53
9500,00	80,57	11,27	23,74	76,26
6350,00	80,71	11,29	35,02	64,98
4750,00	45,88	6,42	41,44	58,56
3400,00	35,88	5,02	46,46	53,54
2360,00	18,32	2,56	49,02	50,98
1700,00	8,02	1,12	50,14	49,86
1180,00	1,97	0,28	50,42	49,58
840,00	1,86	0,26	50,68	49,32
600,00	0,76	0,11	50,79	49,21
425,00	0,51	0,07	50,86	49,14
300,00	0,46	0,06	50,92	49,08
212,00	4,78	0,67	51,59	48,41
150,00	18,07	2,53	54,12	45,88
106,00	80,93	11,32	65,44	34,56
75,00	36,07	5,04	70,48	29,52
53,00	67,82	9,49	79,97	20,03
38,00	87,36	12,22	92,18	7,82
-38,00	55,88	7,82	100,00	0,00
Total	714,99	100,00		

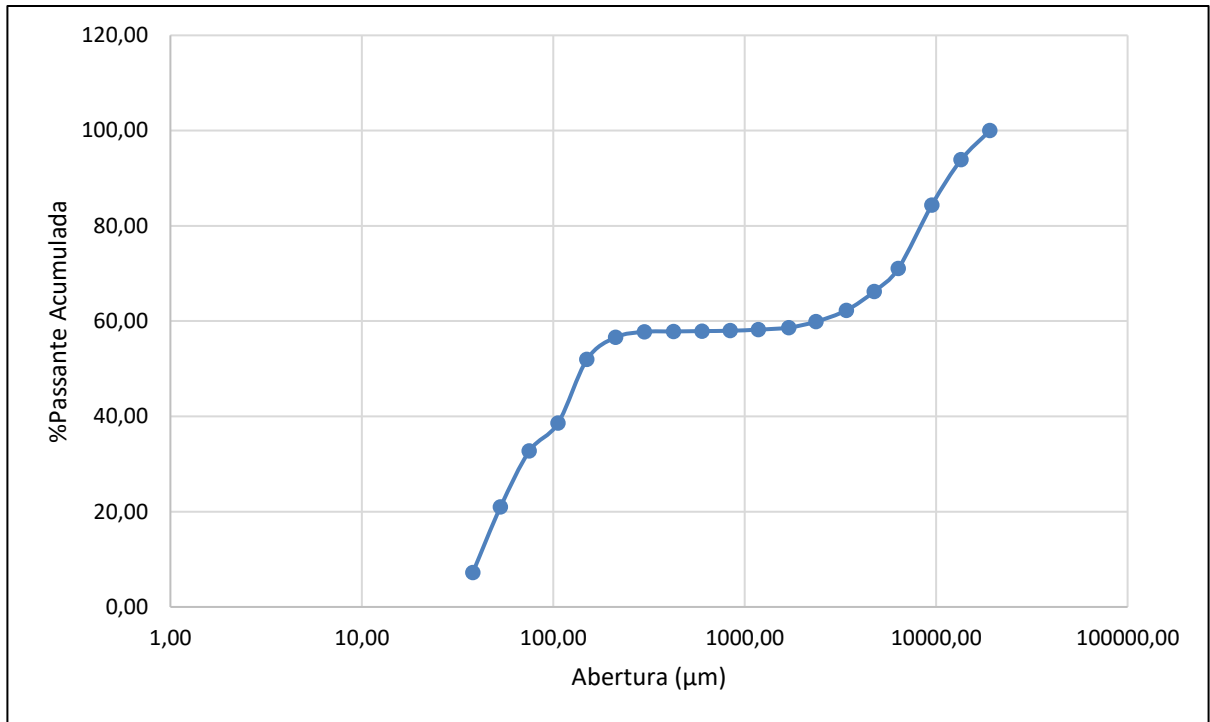
SOLUTRIX 100 – Comparativo Geral

0,09 gramas Solutrix 100 (50g/t)



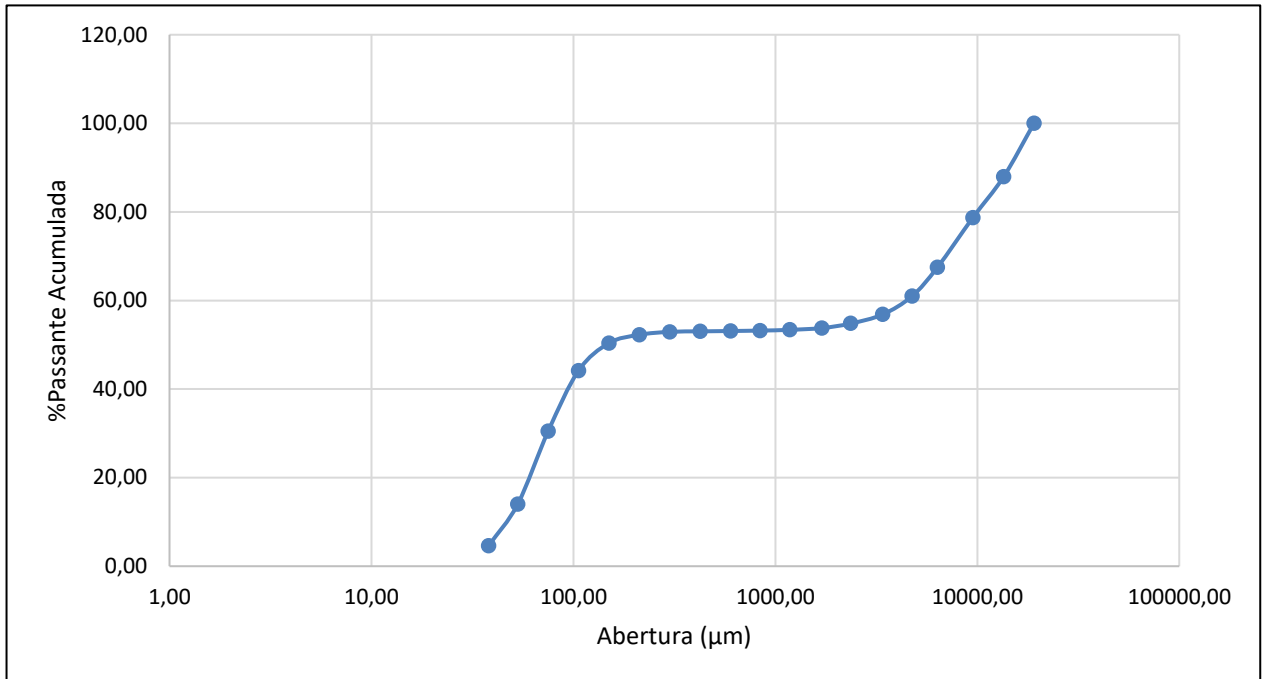
Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	60,37	9,07	9,07	90,93
9500,00	69,96	10,51	19,57	80,43
6350,00	70,93	10,65	30,23	69,77
4750,00	25,04	3,76	33,99	66,01
3400,00	26,42	3,97	37,96	62,04
2360,00	11,73	1,76	39,72	60,28
1700,00	7,65	1,15	40,87	59,13
1180,00	3,01	0,45	41,32	58,68
840,00	1,27	0,19	41,51	58,49
600,00	0,69	0,10	41,61	58,39
425,00	0,64	0,10	41,71	58,29
300,00	0,84	0,13	41,84	58,16
212,00	4,14	0,62	42,46	57,54
150,00	27,14	4,08	46,53	53,47
106,00	130,26	19,56	66,10	33,90
75,00	29,00	4,36	70,46	29,54
53,00	125,05	18,78	89,24	10,76
38,00	63,41	9,52	98,76	1,24
-38,00	8,25	1,24	100,00	0,00
Total	665,80	100,00		

0,18 gramas Solutrix 100 (100g/t)



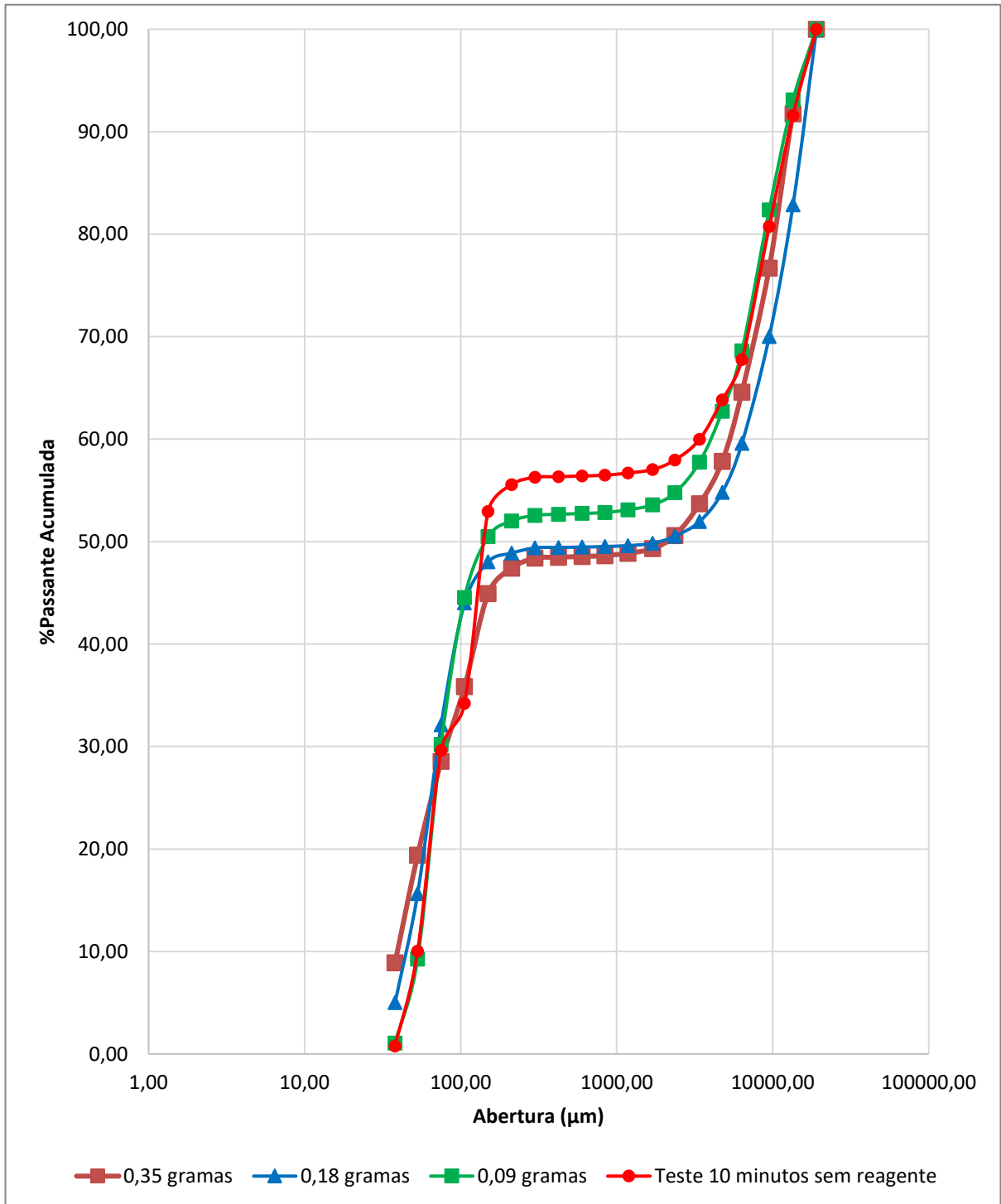
Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	41,44	6,13	6,13	93,87
9500,00	64,05	9,48	15,61	84,39
6350,00	89,98	13,32	28,93	71,07
4750,00	32,61	4,83	33,75	66,25
3400,00	26,83	3,97	37,72	62,28
2360,00	16,03	2,37	40,10	59,90
1700,00	8,48	1,25	41,35	58,65
1180,00	2,93	0,43	41,78	58,22
840,00	1,56	0,23	42,01	57,99
600,00	0,47	0,07	42,08	57,92
425,00	0,54	0,08	42,16	57,84
300,00	0,55	0,08	42,25	57,75
212,00	7,72	1,14	43,39	56,61
150,00	31,57	4,67	48,06	51,94
106,00	90,08	13,33	61,39	38,61
75,00	39,79	5,89	67,28	32,72
53,00	79,38	11,75	79,03	20,97
38,00	92,89	13,75	92,77	7,23
-38,00	48,84	7,23	100,00	0,00
Total	675,74	100,00		

0,35 gramas Solutrix 100 (200g/t)

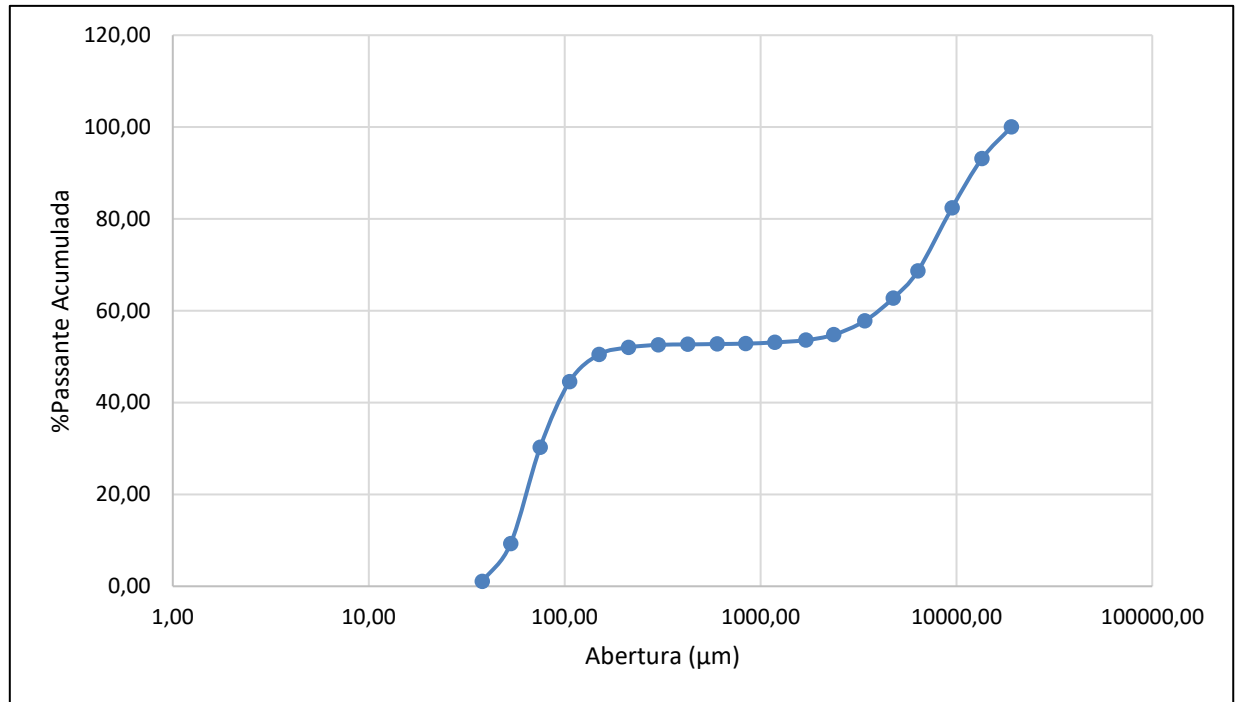


Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	84,05	12,08	12,08	87,92
9500,00	64,27	9,23	21,31	78,69
6350,00	77,86	11,19	32,50	67,50
4750,00	45,50	6,54	39,03	60,97
3400,00	28,69	4,12	43,15	56,85
2360,00	14,25	2,05	45,20	54,80
1700,00	7,15	1,03	46,23	53,77
1180,00	2,78	0,40	46,63	53,37
840,00	1,19	0,17	46,80	53,20
600,00	0,65	0,09	46,89	53,11
425,00	0,56	0,08	46,97	53,03
300,00	0,78	0,11	47,08	52,92
212,00	4,64	0,67	47,75	52,25
150,00	13,01	1,87	49,62	50,38
106,00	43,39	6,23	55,85	44,15
75,00	95,09	13,66	69,52	30,48
53,00	114,67	16,47	85,99	14,01
38,00	65,51	9,41	95,40	4,60
-38,00	32,00	4,60	100,00	0,00
Total	696,04	100,00		

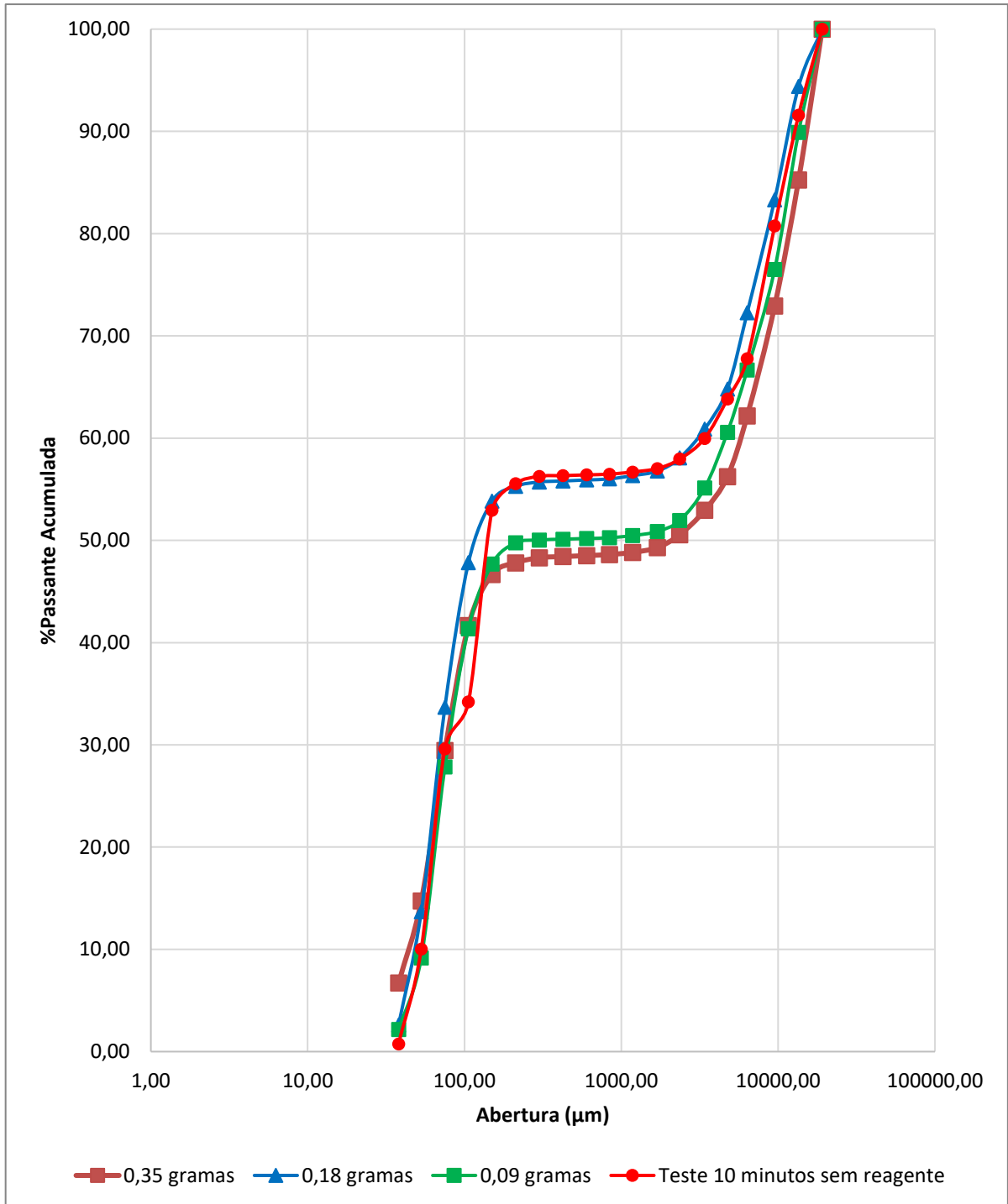
SOLUTRIX A40 – Comparativo Geral



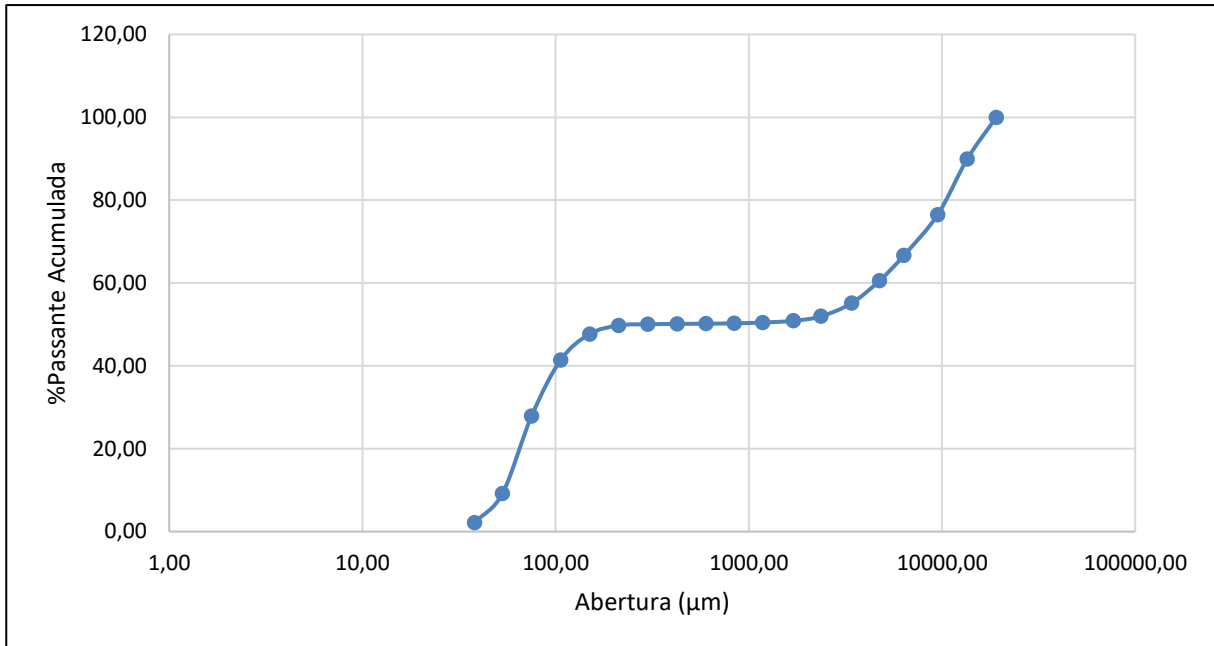
0,09 gramas Solutrix A40 (50g/t)



Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	49,02	6,89	6,89	93,11
9500,00	76,21	10,72	17,61	82,39
6350,00	97,90	13,77	31,38	68,62
4750,00	41,86	5,89	37,27	62,73
3400,00	35,37	4,97	42,25	57,75
2360,00	21,23	2,99	45,23	54,77
1700,00	8,33	1,17	46,40	53,60
1180,00	3,54	0,50	46,90	53,10
840,00	1,85	0,26	47,16	52,84
600,00	0,63	0,09	47,25	52,75
425,00	0,62	0,09	47,34	52,66
300,00	0,69	0,10	47,44	52,56
212,00	3,97	0,56	47,99	52,01
150,00	10,85	1,53	49,52	50,48
106,00	42,20	5,94	55,46	44,54
75,00	101,87	14,33	69,78	30,22
53,00	149,04	20,96	90,75	9,25
38,00	58,26	8,19	98,94	1,06
-38,00	7,52	1,06	100,00	0,00
Total	710,96	100,00		

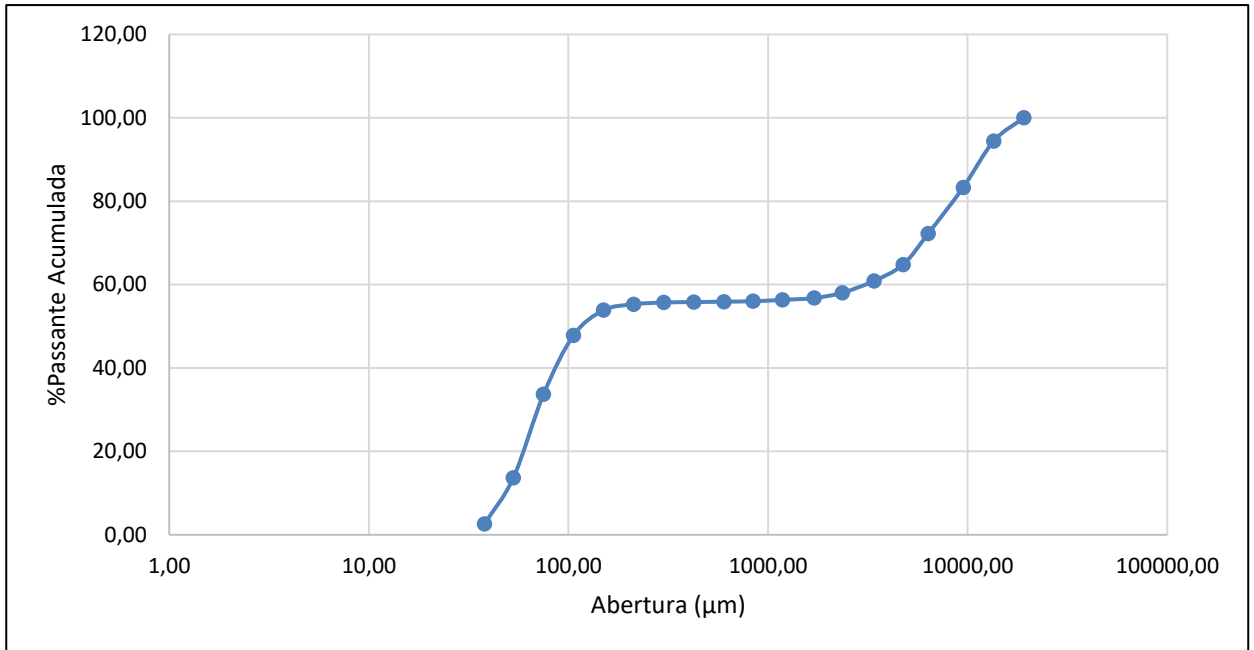
SOLUTRIX D – Comparativo Geral

0,09 gramas Solutrix D (50g/t)



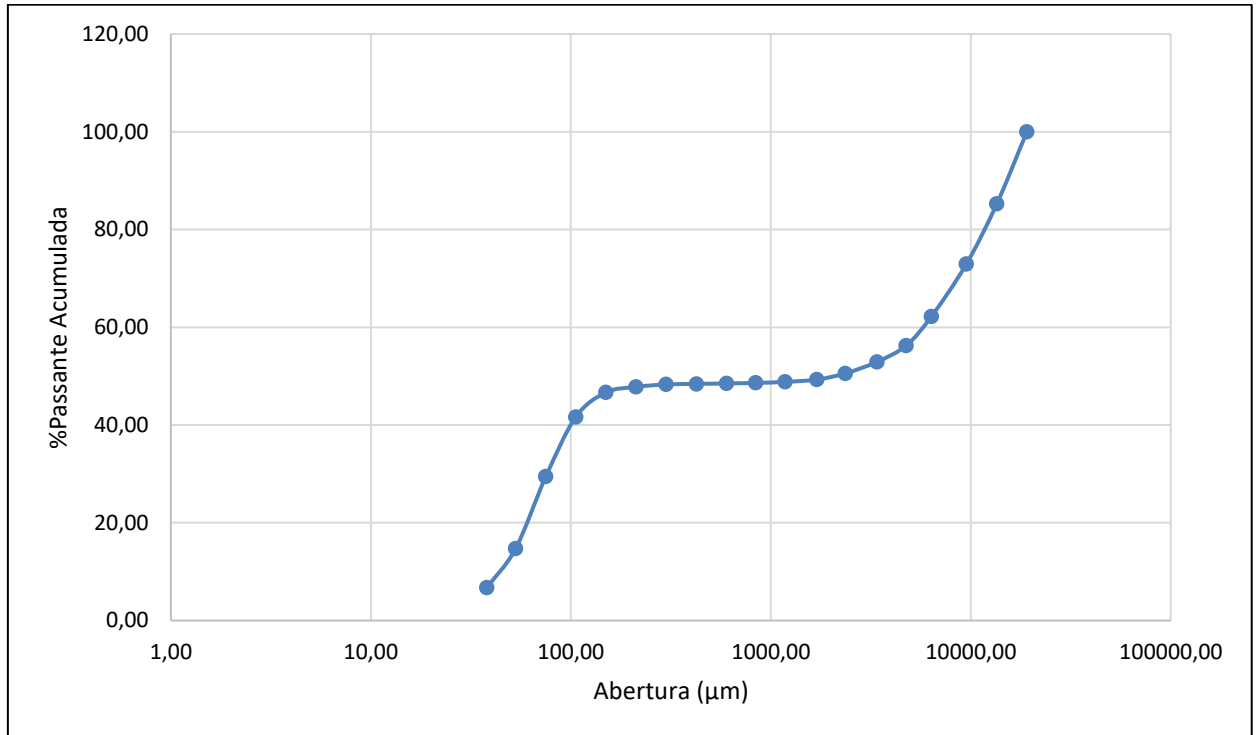
Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	71,50	10,09	10,09	89,91
9500,00	95,02	13,41	23,50	76,50
6350,00	69,68	9,83	33,33	66,67
4750,00	43,19	6,10	39,43	60,57
3400,00	38,61	5,45	44,88	55,12
2360,00	22,44	3,17	48,04	51,96
1700,00	7,69	1,09	49,13	50,87
1180,00	2,87	0,41	49,53	50,47
840,00	1,49	0,21	49,74	50,26
600,00	0,51	0,07	49,82	50,18
425,00	0,48	0,07	49,88	50,12
300,00	0,56	0,08	49,96	50,04
212,00	2,00	0,28	50,25	49,75
150,00	14,61	2,06	52,31	47,69
106,00	44,82	6,33	58,63	41,37
75,00	95,79	13,52	72,15	27,85
53,00	132,42	18,69	90,84	9,16
38,00	49,51	6,99	97,83	2,17
-38,00	15,41	2,17	100,00	0,00
Total	708,60	100,00		

0,18 gramas Solutrix D (100g/t)

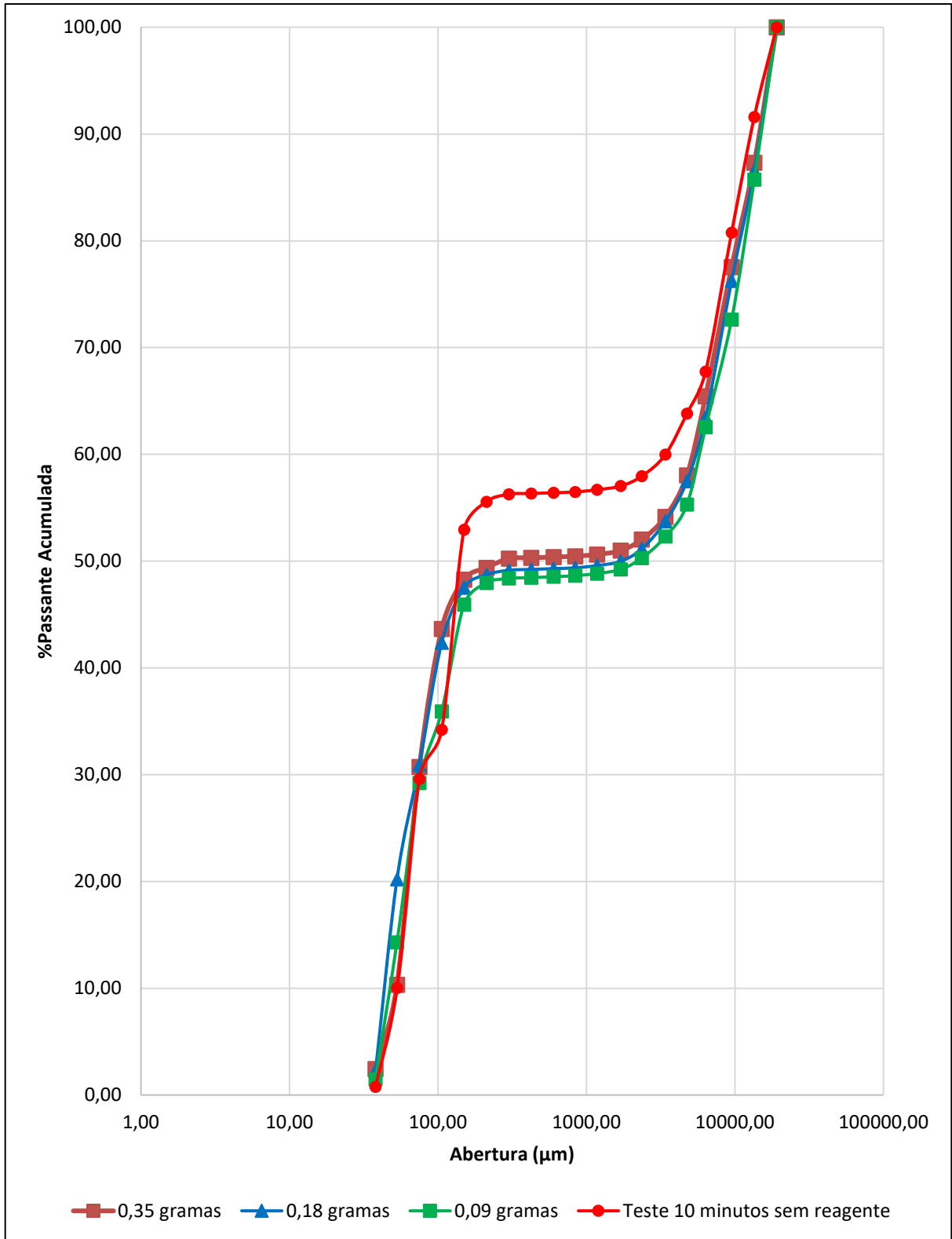


Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	37,35	5,61	5,61	94,39
9500,00	73,74	11,08	16,69	83,31
6350,00	73,60	11,05	27,74	72,26
4750,00	49,63	7,45	35,19	64,81
3400,00	26,07	3,92	39,11	60,89
2360,00	18,81	2,83	41,94	58,06
1700,00	8,55	1,28	43,22	56,78
1180,00	2,99	0,45	43,67	56,33
840,00	2,14	0,32	43,99	56,01
600,00	0,68	0,10	44,09	55,91
425,00	0,67	0,10	44,19	55,81
300,00	0,66	0,10	44,29	55,71
212,00	2,85	0,43	44,72	55,28
150,00	9,53	1,43	46,15	53,85
106,00	40,14	6,03	52,18	47,82
75,00	94,14	14,14	66,32	33,68
53,00	133,09	19,99	86,31	13,69
38,00	73,75	11,08	97,39	2,61
-38,00	17,39	2,61	100,00	0,00
Total	665,78	100,00		

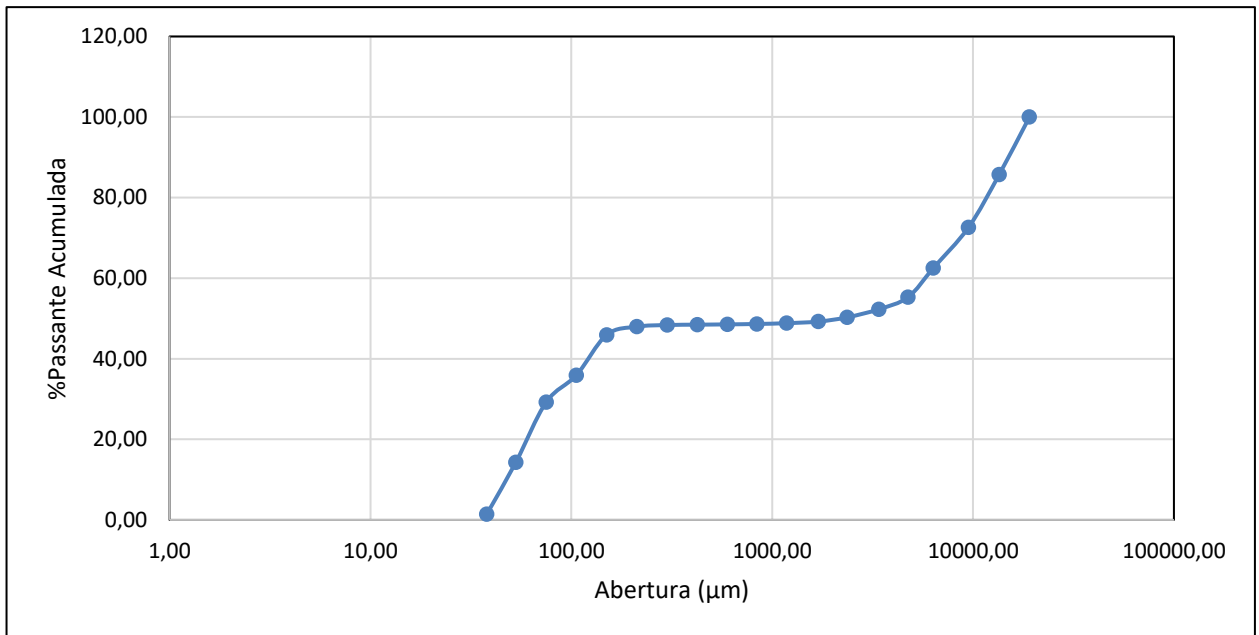
0,35 gramas Solutrix D (200g/t)



Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	107,18	14,75	14,75	85,25
9500,00	89,70	12,34	27,09	72,91
6350,00	77,96	10,73	37,82	62,18
4750,00	43,21	5,95	43,76	56,24
3400,00	24,00	3,30	47,06	52,94
2360,00	17,22	2,37	49,43	50,57
1700,00	9,17	1,26	50,70	49,30
1180,00	3,51	0,48	51,18	48,82
840,00	1,49	0,21	51,38	48,62
600,00	0,78	0,11	51,49	48,51
425,00	0,69	0,09	51,59	48,41
300,00	0,79	0,11	51,69	48,31
212,00	3,67	0,50	52,20	47,80
150,00	8,24	1,13	53,33	46,67
106,00	36,36	5,00	58,34	41,66
75,00	88,82	12,22	70,56	29,44
53,00	106,95	14,72	85,27	14,73
38,00	58,27	8,02	93,29	6,71
-38,00	48,76	6,71	100,00	0,00
Total	726,77	100,00		

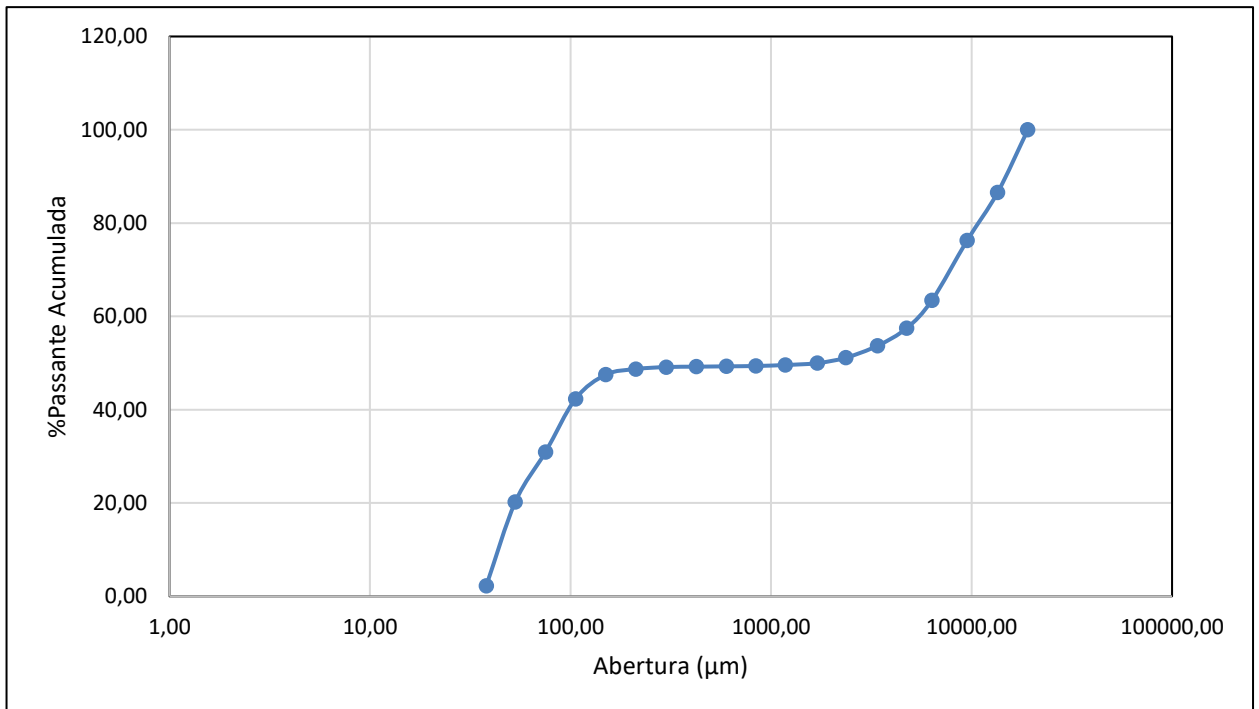
SOLUTRIX L 200 – Comparativo Geral

0,09 gramas Solutrix L 200 (50g/t)



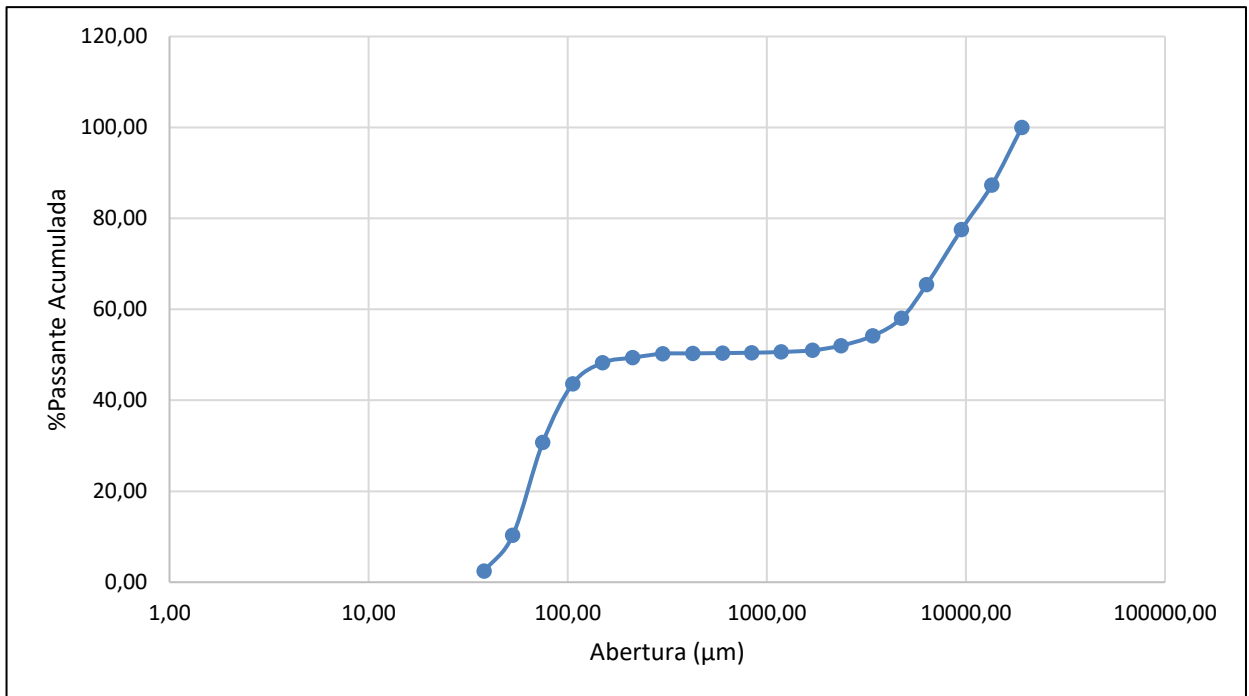
Abertura (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	108,26	14,27	14,27	85,73
9500,00	99,53	13,11	27,38	72,62
6350,00	76,47	10,08	37,46	62,54
4750,00	55,02	7,25	44,71	55,29
3400,00	22,72	2,99	47,70	52,30
2360,00	15,31	2,02	49,72	50,28
1700,00	7,95	1,05	50,76	49,24
1180,00	3,04	0,40	51,17	48,83
840,00	1,49	0,20	51,36	48,64
600,00	0,77	0,10	51,46	48,54
425,00	0,57	0,08	51,54	48,46
300,00	0,69	0,09	51,63	48,37
212,00	3,10	0,41	52,04	47,96
150,00	15,39	2,03	54,07	45,93
106,00	75,94	10,01	64,07	35,93
75,00	50,89	6,71	70,78	29,22
53,00	113,17	14,91	85,69	14,31
38,00	97,46	12,84	98,53	1,47
-38,00	11,14	1,47	100,00	0,00
Total	758,91	100,00		

0,18 gramas Solutrix L 200 (100g/t)



Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	99,65	13,41	13,41	86,59
9500,00	76,77	10,33	23,75	76,25
6350,00	94,98	12,78	36,53	63,47
4750,00	44,52	5,99	42,52	57,48
3400,00	27,93	3,76	46,28	53,72
2360,00	19,06	2,57	48,85	51,15
1700,00	8,70	1,17	50,02	49,98
1180,00	2,96	0,40	50,42	49,58
840,00	1,58	0,21	50,63	49,37
600,00	0,55	0,07	50,70	49,30
425,00	0,55	0,07	50,78	49,22
300,00	0,59	0,08	50,86	49,14
212,00	3,19	0,43	51,28	48,72
150,00	8,93	1,20	52,49	47,51
106,00	38,39	5,17	57,65	42,35
75,00	84,90	11,43	69,08	30,92
53,00	79,61	10,72	79,80	20,20
38,00	133,18	17,93	97,72	2,28
-38,00	16,93	2,28	100,00	0,00
Total	742,97	100,00		

0,35 gramas Solutrix L 200 (200g/t)



Abertura (μm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
19090,00	0,00	0,00	0,00	100,00
13500,00	93,72	12,70	12,70	87,30
9500,00	72,09	9,77	22,46	77,54
6350,00	89,28	12,10	34,56	65,44
4750,00	54,66	7,40	41,96	58,04
3400,00	28,65	3,88	45,84	54,16
2360,00	15,71	2,13	47,97	52,03
1700,00	7,60	1,03	49,00	51,00
1180,00	2,76	0,37	49,38	50,62
840,00	1,21	0,16	49,54	50,46
600,00	0,56	0,08	49,62	50,38
425,00	0,52	0,07	49,69	50,31
300,00	0,57	0,08	49,76	50,24
212,00	6,34	0,86	50,62	49,38
150,00	8,27	1,12	51,74	48,26
106,00	34,02	4,61	56,35	43,65
75,00	95,43	12,93	69,28	30,72
53,00	150,58	20,40	89,68	10,32
38,00	58,14	7,88	97,56	2,44
-38,00	18,04	2,44	100,00	0,00
Total	738,15	100,00		