

Série Tecnologia Mineral

Processamento de diamantes sintéticos presentes em resíduos de teares multifio diamantados

**Francisco Wilson Hollanda Vidal
Victor Moza Ponciano
Phillipe Fernandes de Almeida
Mateus Valentim Simmer Sopeletto**



SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

**Processamento de diamantes sintéticos presentes em
resíduos de teares multifio diamantados**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Luciana Santos

Ministra de Estado

Luis Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Isa Assef dos Santos

Subsecretária de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Silvia Cristina Alves França

Diretora

Maurício Moutinho da Silva

Coordenador de Administração - COADM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Paulo Fernando Almeida Braga

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Marisa Nascimento

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

STM - 105

Processamento de diamantes sintéticos presentes em resíduos de teares multifio diamantados

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Engenheiro de Minas, D.Sc. em Engenharia Mineral pela USP.

Victor Moza Ponciano

Engenheiro de Minas, Especialista em Tecnologias de Produção de Rochas Ornamentais pelo IFES.

Phillipe Fernandes de Almeida

Tecnólogo em Rochas Ornamentais, D.Sc. em Geociências pela USP.

Mateus Valentim Simmer Sopeletto

Engenheiro de Minas, Especialista em Tecnologias de Produção de Rochas Ornamentais pelo IFES.

CETEM/MCTI

2024

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

Editor: Marisa Bezerra de Mello Monte

Subeditor: Paulo Fernando Almeida Braga

CONSELHO EDITORIAL: Achilles Junqueira Bourdot Dutra (UFRJ), Denilson da Silva Costa (UNIFESSPA), Hudson Jean Bianchini Couto (CETEM), Elves Matiolo (CETEM), Iranildes Daniel Santos (VALE-ITV), Marisa Nascimento (CETEM), Ivo André Homrich Schneider (UFRGS), Carina Ulsen (EPUSP).

No ano de 2024 a Série Tecnologia Mineral completa 45 anos de sua primeira publicação, iniciada com o trabalho “Flotação de Carvão – Estudos em Escala de Bancada” de autoria dos Engenheiros Antonio Campos, Salvador Almeida e Amílcar Santos. Desde então foram publicados 104 séries de diversos pesquisadores do CETEM ou externos a instituição versando sobre o tema tecnologia mineral.

A *Série Tecnologia Mineral* é dedicada à inovação e desenvolvimento em processamento mineral e metalurgia extrativa. Fazem parte do escopo da série tópicos de pesquisa e práticas operacionais que incluem caracterização mineralógica, métodos de cominuição (britagem e moagem), processos gravíticos, separação magnética, flotação, desaguamento, métodos químicos, bio-, hidro-, eletro- e pirometalurgia (metalurgia extrativa), processos de controle, instrumentação e simulações computacionais. Problemas ambientais relativos ao desenvolvimento sustentável, balanço de ciclo de vida de produtos e matérias primas minerais e avanços no processamento mineral também são abordados.

Na *Série Tecnologia Mineral*, são publicadas revisões, estudos e trabalhos de PD&I desenvolvidos no CETEM ou em parceria.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Copyright © 2024 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação de copyright (Lei 5.988)

Valéria Cristina de Souza
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves
Projeto Gráfico

Informações:
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

CIP – Catalogação na Publicação

P963

Processamento de diamantes sintéticos presentes em resíduos de teares
multifio diamantados / Francisco Wilson Hollanda Vidal [et al.] –
Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2024.
49 p. - (Série Tecnologia Mineral; 105).

ISBN 978-65-5919-061-4.

1. Processamento de minérios. 2. Rochas ornamentais. 3. Resíduos.
4. Flotação. 5. Diamante sintético. I. Vidal, Francisco Wilson Hollanda.
II. Ponciano, Victor Moza. III. Almeida, Phillipe Fernandes. IV. Sopeletto,
Mateus Valentim Simmer. V. Centro de Tecnologia Mineral. VI. Série.

CDD 622.7

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3 METODOLOGIA E RESULTADOS	23
3.1 Amostragem, Preparação e Caracterização dos Resíduos	23
3.2 Análise Granulométrica	25
3.3 Ensaio de Classificação	26
3.4 Fluorescência de Raio X - FRX	30
3.5 Ensaio de Separação Magnética	31
3.6 Ensaio de Flotação	32
3.7 Ensaio em Mesa Vibratória, Espiral Humphrey e Concentrador Kelson	37
3.8 Separação em Meio Denso	38
3.9 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	39
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5 CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

RESUMO

O presente estudo segue os preceitos da economia circular e mineração urbana, visando o aproveitamento de resíduos industriais da mineração de rochas ornamentais. O objetivo é analisar diferentes métodos de tratamento de minérios na recuperação do diamante sintético presente nos resíduos da serragem das rochas. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica explorando os avanços científicos e tecnológicos dos processos de recuperação já desenvolvidos para esse fim. Com essas informações, iniciou-se a pesquisa tecnológica em campo e laboratório por meio da amostragem e preparação de cerca de 12 toneladas de Finos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais - FIBRO da serragem de granitos comerciais, quartzitos e mistura de rochas em diversas empresas. Assim, foi iniciada a preparação e caracterização das amostras quanto à composição, granulometria e quantidade de diamante. Em seguida, foram realizados ensaios para a concentração do diamante incluindo classificação por peneiras e hidrociclone, concentração gravimétrica (mesa vibratória, espiral concentradora Humphrey e concentrador KNelson), separação magnética e flotação. Os resultados obtidos na presente pesquisa visando a recuperação de diamante de FIBRO de rochas graníticas utilizando-se o processo de flotação foram satisfatórios. Para esse processo, foi possível definir os reagentes mais eficientes e as faixas granulométricas com maiores teores do material. Dessa forma, o presente estudo oferece um avanço na aplicação da tecnologia de flotação para o aproveitamento desses resíduos industriais.

Palavras-chave

Processamento de minérios, rochas ornamentais, resíduos, flotação, diamante sintético.

ABSTRACT

The present study follows the principles of circular economy and urban mining, aiming at the recovery of industrial waste from natural stone mining. The objective is to analyze different ore treatment methods for the recovery of synthetic diamond present in the waste from rock sawing. To this end, a literature review was conducted, exploring scientific and technological advancements in recovery processes already developed for this purpose. With this information, technological research began in the field and laboratory through the sampling and preparation of approximately 12 tons of Natural Stone Processing Fines (FIBRO) from the sawing of commercial granites, quartzites, and mixed rocks in various companies. Thus, the preparation and characterization of the samples were started focusing on composition, granulometry, and the amount of diamond present. Then, it was carried out tests for diamond concentration, including classification by sieves and hydrocyclone, gravity concentration (shaking table, Humphrey spiral concentrator, and Knelson concentrator), magnetic separation, and flotation. The results obtained in this research, aimed at recovering diamonds from FIBRO of granitic rocks using the flotation process, were satisfactory. For this process, the most efficient reagents and granulometric ranges with the highest material grades were identified. Thus, this study offers an advancement in the application of flotation technology for the recovery of this industrial waste.

Keywords

Mineral processing, natural stones, waste, flotation, synthetic diamond.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais e de revestimento do mundo devido a sua excepcional diversidade de rochas ornamentais, com ênfase nas regiões sudeste e nordeste, tendo como principal produtor o Estado do Espírito Santo seguido dos estados de Minas Gerais, Bahia, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2024).

As rochas são extraídas em pedreiras em forma de blocos e passam por processos industriais que envolvem a serragem dos blocos em chapas em equipamentos denominados teares, o polimento ou outro acabamento superficial das chapas e o recorte para a obtenção de diversos produtos como ladrilhos e bancadas, dentre outros.

Em todos esses processos são utilizadas ferramentas diamantadas para corte e abrasão, tais ferramentas são compostos formados por diamantes sintéticos envolvidos em uma matriz metálica ou polimérica, como: pastilhas ou segmentos de corte em serras circulares e lâminas de teares de mármore; em abrasivos de polimento; e nas pérolas (anéis ou segmentos) montadas em cabos de aço, denominados de fios diamantados, utilizados tanto no corte dos maciços e esquadrejamento de blocos quanto no desdobramento em chapas nos denominados teares multifio.

A produção de rochas ornamentais gera grande quantidade de resíduos grossos (blocos e casqueiros) e finos (FIBRO - Finos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais), sendo especialmente importantes devido ao grande volume descartado. Os resíduos finos da etapa de serragem correspondem a pouco mais de 25% da massa do bloco transformado em chapas (VIDAL et al., 2014). Na serragem em teares multifio, os diamantes quebrados ou

arrancados da massa das pérolas de corte durante o processo, são descartados junto com o pó de rocha gerado durante o corte (KONSTANTY, 2017), cuja destinação são os aterros licenciados pelos órgãos públicos de meio ambiente. O Estado do Espírito Santo, o qual possui o maior parque industrial de beneficiamento de rochas ornamentais do Brasil, é o maior produtor e conseqüentemente o maior gerador de resíduos. Um dos principais desafios do setor é encontrar possibilidades para a reutilização desse material, principalmente como matéria-prima em outras cadeias produtivas.

Uma linha de pesquisa vem sendo desenvolvida ao longo dos anos a respeito da viabilidade técnica do aproveitamento do FIBRO para recuperação dos diamantes sintéticos presentes nele (SOUZA et al., 2012; SOUZA e VIDAL, 2013; EGRAMPHONTE e VIDAL, 2019 e 2020; ALMEIDA e VIDAL, 2019; ALVES et al., 2021; TONOLLI et al., 2022; PONCIANO et al., 2024). Os estudos já realizados abordam diferentes métodos para o tratamento de minérios que apresentam resultados promissores no que tange a capacidade técnica de se realizar a separação dos componentes do resíduo e concentração dos grãos de interesse, nesse caso, o diamante sintético.

Portanto, o objetivo da pesquisa é realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre a recuperação de diamantes sintéticos de resíduos da serragem de rochas ornamentais, explorando os avanços científicos e tecnológicos dos métodos envolvidos nesses processos. Dessa forma, aplicar esse conhecimento em uma pesquisa tecnológica em escala de laboratório, promovendo ensaios em diferentes metodologias de tratamento de minérios visando complementar o desenvolvimento de estudos no aproveitamento de resíduos de mineração.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os diamantes sintéticos, produzidos através de técnicas avançadas de síntese, representam uma fascinante fronteira na indústria de gemologia e mineração. Desde sua primeira produção em larga escala no século passado, essas gemas artificiais têm desafiado conceitos convencionais e criado um cenário dinâmico de pesquisa e desenvolvimento. Ao longo dos anos, inúmeros estudos têm explorado suas propriedades, aplicações e os desafios associados à sua produção.

Dessa forma a produção de diamantes sintéticos ainda tem sido objeto de pesquisa e desenvolvimento e impulsionada pela demanda por materiais de alta qualidade em uma variedade de indústrias. Em destaque, ressalta-se os estudos desenvolvidos no final da década de 1970 para usos em pérolas de fio diamantados para cortes de rochas na mineração de rochas ornamentais. O advento do fio diamantados foi substituindo o uso de outras tecnologias inferiores como o fio helicoidal. A característica principal dos fios diamantados é aliar a alta dureza do diamante e a flexibilidade do cabo de aço, o que o torna eficiente para operações em condições adversas, sendo muito utilizado na construção civil para corte de elementos duros (KONSTANTY, 2021).

A Diamant Boart foi a pioneira no desenvolvimento do fio diamantado, dando início ao corte do mármore na região de Carrara, e logo no final da década de 1980 foi usado para os granitos na Sardenha. As universidades italianas também deram suas contribuições onde na época realizaram diversos estudos relacionados a tecnologia de fio diamantado.

O fio diamantado é constituído por um cabo de aço galvanizado, que funciona como suporte para as pérolas diamantadas (Figura 1). As pérolas são peças abrasivas compostas por um ligante de matriz metálica e diamantes sintéticos como elemento de corte (Figura 2). A matriz é responsável pela retenção dos diamantes para que estes executem o corte por meio do desgaste abrasivo. Estas pérolas possuem dureza definida de acordo com o tipo de material a ser cortado, para permitir seu desgaste eficiente e, com isto, o afloramento de novos diamantes de maneira constante. A pasta diamantada é depositada nos anéis de suporte por meio de processos de sinterização ou eletrodeposição (MACHADO, 2013).



Figura 1. Fios diamantados revestidos com polímero e borracha.



Figura 2. Fotografia em detalhe de uma pérola diamantada que compõe o fio para corte de rochas.

A indústria de ferramentas diamantadas vem passando por melhorias nos últimos anos e são várias as linhas de pesquisas realizadas no Brasil sobre a caracterização dos elementos abrasivos e processamento e caracterização das matrizes metálicas, como em Vidal (1999), Oliveira, (2005 e 2009), Almeida (2012), Aguiar (2016) e Moreira Jr. (2013 e 2018).

O princípio do corte com fio diamantado se dá pela ação abrasiva das pérolas diamantadas dispostas ao longo do fio, que funciona como uma serra fita, que rotaciona a determinadas velocidades e tensões. As polias motrizes impulsionam o movimento de translação e rotação do fio, tensionado, em contato com o bloco de rocha. Durante o corte, o sulco realizado pelo corte é alimentado com água para arrefecimento da interface fio/rocha e para a remoção das partículas provenientes do desgaste dos componentes em atrito. A Figura 3 mostra os detalhes do processo de serragem com tear multifio diamantado.



Figura 3. Detalhe do processo de serragem com tear multifio diamantados.

O uso da tecnologia de corte multifio para rochas ornamentais oferece um desempenho ambientalmente favorável em comparação aos tradicionais teares multilâmina. Enquanto os

teares multilâmina requerem uma polpa abrasiva composta por granalha de aço ou ferro, bentonita ou cal e água para realizar o corte, o tear multifio utiliza apenas água e pérolas diamantadas para a serragem dos blocos. O resíduo fino gerado é composto essencialmente por água, pó de rocha e cristais de diamante que são desprendidos da pérola diamantada durante este processo (SOUZA et al., 2012). Estima-se que atualmente no Brasil existem instalados e em funcionamento cerca de 600 teares multifio (ABIROCHAS, 2024).

Nas etapas de serragem e polimento das chapas, cerca de 3,4 Mt de resíduos são produzidos segundo Camara (2021). Tomando-se por base o diâmetro de pérola diamantada médio de 7,30 mm, sabe-se que o resíduo fino gerado apenas na etapa de serragem corresponde então a $7,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ por m^2 de chapa serrada. Considerando então apenas a quantidade de chapas exportadas no ano de 2023, cerca de 16,6 Mm^2 (ABIROCHAS, 2024), calcula-se que esse montante, somados aos 85 Mm^2 de chapas consumidas no mercado interno, tenha gerado cerca de 765 mil m^3 de resíduo fino de serragem, em sua maior parte depositada em aterros no estado do Espírito Santo, o qual possui o maior parque industrial.

Os resíduos do processo de serragem de blocos no Brasil são compostos por uma significativa quantidade de rochas com uma gama de variedades de minerais, visto a diversidade geológica dos materiais lavrados e beneficiados atualmente nas empresas de rochas ornamentais brasileiras. Estima-se que haja mais de 1200 variedades litológicas de rochas no Brasil em pelo menos 1500 frentes de lavras ativas (ABIROCHAS, 2018). Na Figura 4 é possível observar o ciclo de produção e deposição dos resíduos finos.



Figura 4. Esquema de produção e deposição de resíduos finos gerados por tear multifio diamantado.

Esses resíduos de diferentes litotipos formam uma mistura contendo muitos minerais, sendo que cada um apresenta propriedades distintas e influenciarão na escolha do tipo de beneficiamento mais adequado para seu processamento. Ou seja, um processo tecnológico adequado para concentração e separação de um mineral nem sempre é efetivo para um mineral similar, sendo importante uma caracterização que apresentem avaliações quantitativas ou semiquantitativas do minério beneficiado (PORPHÍRIO et al., 2010).

A crescente preocupação com a preservação ambiental tem enfatizado a necessidade de abordar o impacto dos resíduos industriais em todos os setores da economia, assim como aqueles provenientes da indústria das rochas ornamentais. Nesse contexto, há uma busca intensificada por soluções que sejam

simultaneamente econômicas e ambientalmente sustentáveis, promovendo o desenvolvimento sustentável e valorizando a cadeia produtiva.

O objetivo é encontrar métodos eficientes para reaproveitar esses materiais, evitando seu descarte desnecessário e reintegrando-os na economia. Dessa forma, pesquisas atuais estão focadas na reutilização desses resíduos em diversos setores, incluindo a indústria cerâmica, agricultura, indústria de polímeros, pavimentação asfáltica, vidro, cosméticos, papel e argamassa. Centenas de trabalhos de aproveitamento do FIBRO foram realizados nos últimos anos para diversos usos (ALMEIDA, 2023).

O Centro de Tecnologia Mineral Núcleo Regional do Espírito Santo – CETEM/NRES há anos está alinhado com a sustentabilidade e desempenha um papel importante em inovações tecnológicas do setor mineral. Em sua linha de atuação, diversas pesquisas realizadas visam aumentar os parâmetros sustentáveis do setor, a partir da pesquisa e desenvolvimento de projetos voltados principalmente à melhoria contínua de processos e ao aproveitamento dos resíduos industriais de toda cadeia produtiva das rochas ornamentais.

Diversos estudos vêm sendo realizados com a aplicação de diferentes métodos de beneficiamento de minérios já consagrados no meio industrial para recuperação de diamantes sintéticos do FIBRO, apresentando resultados promissores quanto a recuperação de diamantes sintéticos de resíduos da serragem de rochas ornamentais (SOUZA et al., 2012; SOUZA e VIDAL, 2013; EGRAMPHONTE e VIDAL, 2019 e 2020; ALMEIDA e VIDAL, 2019; ALVES et al., 2021; TONOLLI et al., 2022; PONCIANO et al., 2024).

Dentro desse contexto, inicialmente Souza et al. (2012) realizaram um estudo comparativo das duas técnicas de corte, teares multifio e multilâmina, em termos de rendimento, qualidade dos produtos, consumo de insumos e desempenho ambiental. Os resultados obtidos indicam que os resíduos gerados pelo multifio são compostos basicamente de pó de rocha, micro cristais de diamante que se desprendem da pérola e água, sendo considerado inerte. Já para o multilâmina, tem-se pó de rocha, cal, água, granalha de aço ou ferro e a lâmina desgastada. Em termos quantitativos os resíduos do multifio representam, em função da quantidade de chapa produzida (kg/m^2) cerca de 79% do que é gerado no tear multilâmina. Em relação ao consumo de energia elétrica em kw/m^2 de chapa, o tear multifio apresenta 68% do consumo no tear multilâmina.

Em outro estudo, Souza e Vidal (2013) realizaram testes para recuperação dos diamantes presente no resíduo e obtiveram uma concentração de diamantes de 45 g/t (gramas de diamante por tonelada de resíduo), utilizando hidrociclone e separação magnética.

Partindo desta rota de beneficiamento, Egramphonte e Vidal (2019) realizaram ensaios da caracterização dos resíduos e adicionaram a mesa concentradora no processo de beneficiamento. Neste caso, foi obtido uma concentração de 60,6 g/t, mostrando que esta técnica resultou em um concentrado com teor mais elevado em relação ao estudo anterior. Os diamantes obtidos apresentam granulometria da faixa de 0,300 mm e 0,212 mm. Os autores avaliaram a concentração de diamantes nas pérolas diamantadas de fios de corte fornecidos por diversos fabricantes para aplicação em pedreiras. Para isso, utilizaram-se da dissolução em ácido nítrico e apresentaram a seguinte Tabela 1.

Tabela 1. Comparação das concentrações média (%) dos diamantes entre os diferentes fabricantes.

Fabricante	A	B	C	D	E	F
Massa média de diamantes (g)	0,15	0,14	0,19	0,17	0,06	0,16
Concentração média (%)	3,99	4,01	5,77	4,74	2,49	4,48
Diamante/matriz metálica (g/kg)	39,9	40,1	57,7	47,4	25,1	44,8
Desvio padrão	0,29	0,21	0,65	0,18	0,12	0,13
Coefficiente de variação (%)	7,26	5,27	11,43	3,87	4,93	2,81

Fonte: Egramphonte e Vidal (2019).

Observa-se que, com base nas pérolas comerciais analisadas, a concentração média de diamantes usadas na matriz metálica é de 4,25%, com uma massa média de 0,145 g em cada pérola. Com uma distribuição média de 37 pérolas por metro de fio, calcula-se a presença de aproximadamente 107,3 g de diamante por metro de fio diamantado. Vidal (1999) verificou em seu estudo, diferenças acentuadas no número de diamantes em anéis de pérolas para o mesmo fio diamantado. Egramphonte e Vidal (2019) constataram que ainda há grande variação na quantidade de diamantes presentes em cada pérola diamantada dos diferentes fabricantes do mercado.

Almeida e Vidal (2019) realizaram um estudo em uma empresa de serragem de blocos, onde o sistema de tratamento dos efluentes da serraria foi adequado de forma a concentrar os sólidos mais densos em um primeiro tanque no sistema de tratamento da água para recirculação. O diamante possui densidade elevada se comparados aos outros constituintes do resíduo, por volta de 3,65

g/cm^3 , assim, a tendência é a sua concentração natural no fundo deste primeiro tanque, juntamente com outros compostos mais densos, ocorrendo desta forma uma concentração gravimétrica que faz com que o teor desse concentrado aumente ao longo das serradas. O resíduo processado no estudo foi coletado nesse tanque.

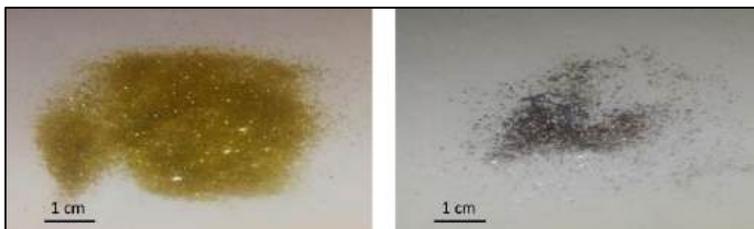
Após a etapa de coleta, o resíduo foi peneirado à úmido e homogeneizado na faixa granulométrica entre as malhas 35 a 100 mesh. Foi obtido assim uma amostra com 675 gramas para a flotação. O concentrado da flotação correspondeu a 0,78% da alimentação. Por se tratar de um concentrado composto em grande parte por minerais com densidades inferiores a $2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$, dentre eles, quartzo e feldspatos, realizou-se a separação da parte densa do concentrado por meio denso utilizando bromofórmio (CHBr_3). Os ensaios de flotação e meio-denso podem ser vistos na Figura 5 abaixo.



Fonte: Almeida e Vidal, 2019.

Figura 5. Flotação do resíduo e concentração em meio denso.

A fração magnética foi retirada do resíduo final com o auxílio de ímã de mão, obtendo-se assim a massa de diamantes (Figura 6). O processo de obtenção do diamante por meio dos processos utilizados nesta etapa ocorreu de forma satisfatória, mostrando que a utilização dos equipamentos de concentração, promoveu a separação bem selecionada do diamante da massa de resíduo. A concentração final do diamante foi da ordem de 0,6% do total do resíduo beneficiado.



Fonte: Almeida e Vidal, 2019.

Figura 6. Diamante concentrado à esquerda e resíduos da separação magnética à direita.

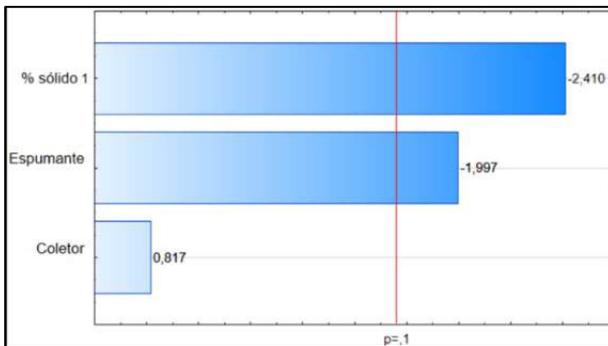
O resultado desse trabalho apresentou uma concentração de diamantes muito superior aos ensaios realizados anteriormente. Tal fato é inferido ao ponto de coleta dos resíduos, o qual foi coletado diretamente na primeira caixa de efluentes do tear, onde se concentraram os fragmentos mais densos do resíduo, incluindo elementos metálicos e diamantes, depositados ao longo de vários processos de serragem.

Outro ponto importante a ser considerado é a concentração de diamantes sintéticos na liga diamantada, que pode variar de fabricante para fabricante e dependerá também de fatores relacionados ao conjunto de rochas processadas e às condições operacionais aplicadas na serragem dos blocos. Essa variação na

concentração pode afetar significativamente a eficiência do processo de recuperação de diamantes e a qualidade do produto final.

Em Alves (2021), foi analisado as condições operacionais do processo de flotação para determinação da mais eficiente em termos de recuperação do diamante. Nesse trabalho foi definido o roteiro operacional que resultou em um melhor aproveitamento do material flotado.

No trabalho mais recente, Ponciano et al. (2024) analisaram a influência de três variáveis no processo de flotação de resíduos. O gráfico da Figura 7 abaixo apresenta o grau de influência das variáveis analisadas.



Fonte: Ponciano et al. (2024).

Figura 7. Grau de influência das variáveis do processo de flotação de FIBRO.

Como observado no gráfico acima, dentre os três parâmetros analisados, apenas a % de sólido e a quantidade de espumante influenciaram significativamente nos resultados de flotação.

A baixa influência do coletor pode ser atribuída a já alta hidrofobicidade do diamante. O tratamento estatístico dos dados indicou a real influência de tais parâmetros nos resultados obtidos.

Os resultados obtidos nesses estudos corroboram para a viabilidade técnica da aplicação de métodos de beneficiamento de minérios para a recuperação de diamantes sintéticos presentes nos resíduos de rochas ornamentais. A partir dos trabalhos referenciados na bibliografia, foram realizados novos estudos conforme apresentados a seguir.

3 | METODOLOGIA E RESULTADOS

A metodologia utilizada nesse estudo, está embasada nos diversos trabalhos já desenvolvidos acerca do tema. Inicialmente, os resíduos foram coletados em diversas fontes dentro da cadeia produtiva das rochas. Esses materiais foram então preparados e seguiram para as etapas de classificação e concentração. Os ensaios de classificação foram realizados através do peneiramento e hidrociclone.

Na separação e concentração dos grãos de interesse, foram testados os métodos como espiral Humpreys, concentrador KNelson, separação magnética, flotação e meio denso.

Os estudos de pesquisa, em campo e laboratório, foram divididos em três etapas a saber: a coleta, amostragem e homogeneização de diversos tipos resíduos de rocha da serragem de blocos; caracterização tecnológica e os ensaios tecnológicos, sendo pesquisado diferentes alternativas de processamento de minérios de modo a servir como base para a definição da rota mais eficiente para o beneficiamento do FIBRO.

3.1 | Amostragem, Preparação e Caracterização dos Resíduos

Durante o estudo a equipe coletou cerca de 12 toneladas de resíduos finos do beneficiamento de rochas ornamentais – FIBRO, com características petrográficas e mineralógicas diferentes, em indústrias e aterros associativos.

As coletas foram executadas de acordo com a Norma NBR 10.007/2004, Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004) em diversos pontos da cadeia produtiva das rochas ornamentais, sendo eles: no expurgo ou na drenagem do multifio, sistema de

decantação, filtro-prensa e em aterro de disposição de resíduos (Figura 8). O objetivo da diversificação dos locais de coleta é observar a variabilidade na concentração de diamantes em cada local, uma vez que se sabe que a gravidade influencia na concentração do diamante pois este possui densidade maior que grande parte dos constituintes dos resíduos.

A determinação da metodologia de amostragem foi definida também com base nos tipos litológicos processados por cada empresa, tendo em vista que tal característica é determinante na quantidade de diamantes concentrados.

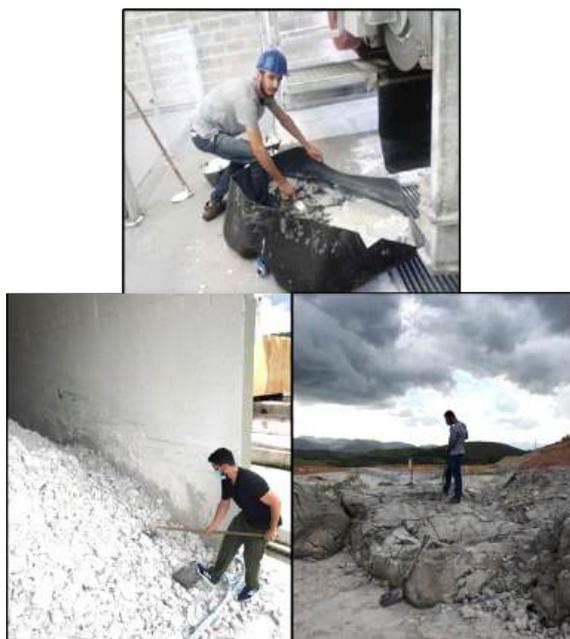


Figura 8. Coleta do resíduo diretamente no multifio, na saída do filtro-prensa e em aterro.

3.2 | Análise Granulométrica

Logo após a coleta nas indústrias e aterros, o material foi transportado para o CETEM/NRES para dar início aos trabalhos de preparação das diversas amostras de cada empresa. O resíduo foi primeiramente homogeneizado para separação de amostras para caracterização tecnológica (Figura 9). Posteriormente, seguiu para as etapas de ensaios tecnológicos em diferentes processos de classificação e concentração.



Figura 9. Construção da pilha cônica (A), fracionamento (B) e distribuição do resíduo na pilha longitudinal (C).

Inicialmente, uma análise granulométrica do FIBRO foi realizada em uma ampla faixa de granulometria por meio do peneiramento à úmido. Foi utilizado a seguinte sequência de peneiras, em escala Tyler: 28, 35, 48, 65, 100, 150, 230, 325, 400 e 635 mesh. A análise granulométrica completa do FIBRO é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Análise granulométrica do FIBRO.

Peneira (mesh)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida simples	% retida acumulada	% passante acumulado
28	0,600	8,70	0,60	0,60	99,40
35	0,425	14,00	0,96	1,56	98,44
48	0,300	8,40	0,58	2,13	97,87
65	0,212	12,20	0,84	2,97	97,03
100	0,150	47,00	3,23	6,20	93,80
150	0,106	176,60	12,12	18,32	81,68
230	0,063	994,10	68,22	86,54	13,46
325	0,044	84,40	5,79	92,33	7,67
400	0,037	71,00	4,87	97,20	2,80
635	0,020	40,80	2,80	100,00	0,00
TOTAL	-	1457,2	100,00	-	-

A análise mostra que a maior parte das partículas é fina, com 81,68% passando pela peneira de 0,106 mm e apenas 2,80% retida na peneira de 0,020 mm. Isso sugere que o FIBRO possui uma granulometria fina, o que pode influenciar suas propriedades físicas e comportamentais nos processos de tratamento subsequentes.

3.3 | Ensaios de Classificação

Nesta fase, o material foi peneirado e classificado em faixas granulométricas que se mostraram mais promissoras para a realização da etapa de concentração dos diamantes (Figura 10). Pôde-se observar a partir da primeira análise que a faixa granulométrica entre 28 e 100 mesh contém maior quantidade de

diamantes. Dessa forma, nessa segunda etapa, os resíduos coletados em 7 fontes diversas foram classificados apenas nessa faixa de interesse.



Figura 10. Classificação do resíduo em peneirador de coluna.

Nesse processo, essa faixa de interesse foi dividida em 4 partes, sendo: Faixa 1: 28-35 mesh, Faixa 2: 35-48 mesh, Faixa 3: 48-65 mesh e Faixa 4: 65-100 mesh.

A Tabela 3 abaixo mostra a distribuição granulométrica de 7 amostras de resíduos oriundas de diferentes fontes. A alimentação das peneiras foi diferente em cada amostra, na forma: Amostra A (150 kg), Amostra B (175 kg), Amostra C (160 kg), Amostra D (130 kg), Amostra E (124 kg), Amostra F (572 kg), Amostra G (280 kg).

Tabela 3. Taxa de recuperação no peneiramento de diferentes resíduos por faixa granulométrica.

Amostra	Peso Retido (g)	Taxa de Recuperação (%)
A1	1237,5	0,8250
A2	1079,4	0,7196
A3	1347,8	0,8985
A4	1750,1	1,1667
B1	73,1	0,0418
B2	75,0	0,0429
B3	121,4	0,0694
B4	176,7	0,1010
C1	1261,1	0,7882
C2	1170,5	0,7316
C3	1440,7	0,9004
C4	1140,6	0,7129
D1	2448,7	1,8836
D2	1878,4	1,4449
D3	2084,9	1,6038
D4	2469,6	1,8997
E1	49,3	0,0503
E2	32,3	0,0330
E3	30,2	0,0308
E4	1,5	0,0015
F1	253,6	0,0443
F2	188,3	0,0329
F3	266,0	0,0465
F4	375,3	0,0656
G1	3686,2	1,3165
G2	2957,8	1,0564
G3	3432,7	1,2260
G4	4219,7	1,5070

Pode-se observar que a recuperação do processo de peneiramento é muito baixa. As amostras B, E e F apresentam a menor recuperação pois são materiais com origem em processos de serragem de quartzitos e coletados no expurgo do multifio e filtro prensa. A amostra D, a qual apresenta a maior recuperação, tem origem nos tanques de decantação do processo de tratamento da água usada na serragem.

Os resíduos coletados no aterro, filtro-prensa e expurgo do multifio não apresentaram recuperação satisfatória, tampouco, apresentaram indícios da presença de diamantes sintéticos. A amostra D da Tabela 3, a qual foi coletada diretamente na primeira caixa do sistema de tratamento de água de umas das empresas, foi a única que se mostrou interessante em termos retenção do diamante. A elevada quantidade de diamantes sintéticos pôde ser notada apenas com o peneiramento dessa amostra, como visto na Figura 11 abaixo.



Figura 11. Concentração dos diamantes na peneira 48 mesh.

A partir dessa constatação, as amostras não satisfatórias foram descartadas e a amostra D seguiu para as etapas posteriores de concentração.

Foi realizado também a classificação dos resíduos por meio de hidrociclone, porém não foram atingidos resultados satisfatórios na classificação das faixas pretendidas. As condições de parâmetros de classificação, através de hidrociclone foram os seguintes: porcentagem de sólido de 30%, minério com densidade de $2,79 \text{ g/cm}^3$ e pressão de operação de 3 psi. Os dados técnicos do hidrociclone utilizado foram os seguintes: diâmetro do ciclone $D_c = 10,8 \text{ cm}$; diâmetro vortex $D_o = 3,2 \text{ cm}$; diâmetro apex $D_u = 1,4 \text{ cm}$ e diâmetro inlet $D_i = 3,2 \text{ cm}$.

3.4 | Fluorescência de Raio X - FRX

Uma amostra de 20 g do resíduo selecionado foi coletada, por meio de métodos de amostragem e homogeneização, para análise química por Fluorescência de Raio X - FRX, com equipamento BRUKER modelo S2 RANGER. Na Tabela 4 abaixo apresenta-se os resultados dessa análise.

Tabela 4. Análise química do FIBRO.

	S ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Outros
Concentração (%)	56,20	16,40	9,96	4,41	4,32	3,83	1,94	1,69	1,25

Tais dados podem ser comparados com as análises químicas realizadas por Egramphonte et al. (2020) no mesmo tipo de resíduo. Os resultados dos autores podem ser vistos na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Análise química do FIBRO de Egramphonte et al. (2020).

	S ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Outros
Concentração (%)	47,50	16,40	15,00	3,05	3,37	5,59	4,03	2,76	1,81

Fonte: Egramphonte et al. (2020).

Ambas análises mostram a elevada concentração de óxido de silício, óxido de alumínio e óxido férrico, mostrando assim a origem predominantemente granítica das rochas que compõe o resíduo.

3.5 | Ensaios de Separação Magnética

De acordo com Sampaio et al. (2018), a atração magnética de um mineral, quando submetido a um campo magnético varia com a sua composição química. A susceptibilidade magnética, por sua vez, é a propriedade que determina a resposta de um mineral à um campo magnético, existindo minerais que são atraídos pelo campo magnético e minerais que são repelidos por esse campo.

Para a realização dos ensaios com o separador magnético, inicialmente foi estudada a escolha da matriz, conforme as instruções descritas no manual do fabricante do equipamento. Segundo o manual, a matriz ideal para os ensaios deve ter o gap (vão livre de distância entre o eletroímã e o polo) de no mínimo 2,5x o “top size” da amostra. Analisando o “top size” das amostras, a matriz ideal para os ensaios é do tipo expandida que possui uma abertura de 1,25 mm. O diamante não apresenta susceptibilidade magnética, portanto, é repelido quando submetido a um campo magnético. Dessa forma, neste ensaio, os minerais atraídos pelo ímã de mão foram descartados e apenas os repelidos prosseguiram para as próximas etapas da pesquisa.

Definido a intensidade de campo e a matriz a ser utilizada, em seguida foi instalado o conjunto de alimentação composto pelo silo de alimentação, corpo do campo magnético com a matriz e o duto de descarga de materiais. O separador magnético modelo L-4 da INBRAS foi usado nos ensaios de separação magnética.

Os resultados dos ensaios realizados no separador magnético faixa de 6.000 a 10.000 Gauss estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados dos ensaios no separador magnético com os produtos magnético e não magnético.

Amostra	Intensidade (Gauss)	Tipo	Massa(g)
A	6.000	Magnético	28,2
		Não Magnético	115,8
	10.000	Magnético	16,3
		Não Magnético	130,9
B	6.000	Magnético	10,2
		Não Magnético	124,1
	10.000	Magnético	4,2
		Não Magnético	129,5

A amostra A apresentou uma quantidade maior de material magnético em ambas as intensidades em comparação com a amostra B. Tanto para a amostra A quanto para a amostra B, houve uma redução na massa de material magnético ao aumentar a intensidade do campo de 6.000 para 10.000 Gauss. Isso sugere que o campo magnético mais intenso atraiu menos material, possivelmente devido a um efeito de saturação magnética.

3.6 | Ensaios de Flotação

Para o ensaio de flotação, utilizou-se uma célula de flotação cilíndrica de bancada, fabricada pela empresa Engendrar modelo CFB 1000N, constituída de um motor, uma polia e um

rotor/estator responsável pelo movimento e agitação da polpa, e pela inserção de ar para dentro da polpa (geração de bolhas). Os mecanismos do processo de flotação do diamante sintético são baseados na flotação de carvão mineral, visto que, assim como o carvão, o diamante é naturalmente hidrofóbico.

Devido ao grande número de variáveis que influenciam o processo, diversos testes preliminares tiveram de ser conduzidos para a definição de parâmetros chave da flotação. As variáveis podem pertencer à 3 esferas, sendo as variáveis operacionais do equipamento (como velocidade de rotação de condicionamento e final, tempo de ação dos reagentes e tempo de coleta do material flotado, etc.), as variáveis da alimentação (como faixa granulométrica, mineralogia, porcentagem de sólidos, etc.) e as variáveis químicas (como a quantidade, qualidade e compatibilidade dos reagentes, a composição mineralógica do resíduo, etc.) (SMAR, 1994; ARGÜELLES – DÍAZ, 2014; OOSTHUIZEN, 2021).

Dessa forma, percebe-se que se deve ter uma parametrização eficiente dos ensaios de forma que se consiga reduzir a influência de tantas variáveis no processo. Para isso, os testes foram evoluindo ao passo que se era determinado os melhores parâmetros dentro de cada esfera.

Antes da escolha definitiva da melhor metodologia de flotação, foram realizados alguns estudos preliminares para se obter um método eficiente para a recuperação dos diamantes do resíduo. O trabalho realizado por Alves (2021) analisou as variáveis velocidade de rotação de condicionamento e final, tempo de ação dos reagentes e tempo de coleta do material flotado para desenvolver uma metodologia padrão para um processo eficiente. O presente trabalho seguiu o método desenvolvido pela autora.

Portanto, os ensaios de flotação primeiramente foram conduzidos com o objetivo de identificar outras possibilidades de reagentes. Com base nos resultados de Ponciano et al. (2024), que mostraram pouca influência do reagente coletor, foram escolhidos três tipos de coletores para se analisar seus comportamentos no processo. Em seguida, uma vez definido o coletor mais eficiente, foi realizada a separação das amostras em faixas granulométricas para se analisar a taxa de recuperação em cada uma delas.

Para os testes dos reagentes, foram testados três coletores diferentes em conjunto com o espumante Metil-Isobutil-Carbinol (MIBC) a fim de se avaliar suas eficiências. Foi preparada uma polpa de 10% de sólidos, ou seja, composta de 900 ml de água, 100 g de amostra de resíduo e com pH de 7. Inicialmente foi estabelecida uma rotação de 800 rpm para o condicionamento, evitando que a polpa transbordasse sem o material de interesse. Após uma estabilização da agitação, foi adicionado o coletor na proporção 900 g/t, após 3 minutos foi adicionado o espumante na proporção 600 g/t e aguardado mais 2 minutos. Após o tempo de condicionamento, foi aberta a válvula de ar, elevada a rotação para 1000 rpm e então, realizado o processo de coleta dos diamantes sintéticos de forma manual, com o auxílio de uma espátula. O processo e o concentrado com os diamantes sintéticos (grãos amarelados) bem evidentes podem ser vistos na Figura 12.



Figura 12. Processo de flotação em célula de 1 L à esquerda e concentrado à direita.

O gráfico da Figura 13 abaixo apresenta os resultados dos testes para os três tipos de coletores usados.

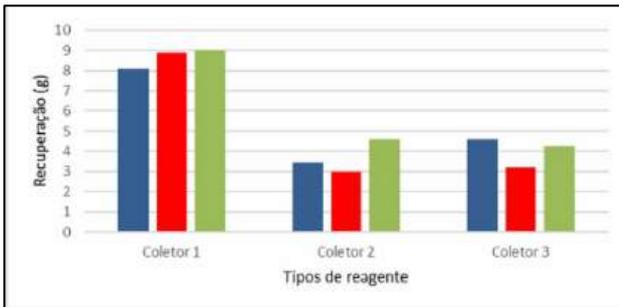


Figura 13. Recuperação de diamante em massa para três tipos de coletores.

Pode-se observar que a combinação entre o Coletor 1 junto do uso do espuma MIBC obteve resultados muito superiores aos outros testados, com eficiência maior em 125%.

Nesse sentido, foi conduzido um segundo teste separando as amostras em diferentes faixas granulométricas (28-35, 35-48, 48-65, 65-100). Os mesmos parâmetros do teste anterior foram empregados e os resultados podem ser vistos no gráfico da Figura 14 abaixo.

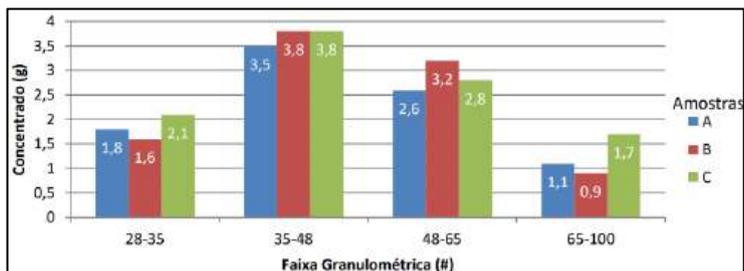


Figura 14. Peso dos concentrados da flotação em cada faixa granulométrica.

A massa dos materiais concentrados nesses testes atingiu médias de 3% da alimentação. Podem ser observados na Figura 15 (A) os rejeitos e concentrado da etapa rougher (primeira etapa de flotação) e a qualidade da purificação atingida já na primeira etapa do processo (B).

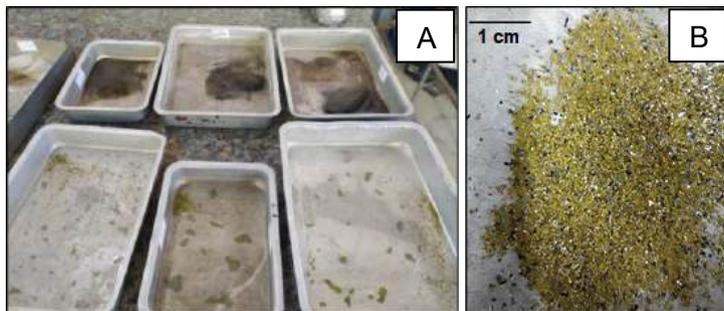


Figura 15. (A) Produtos dos ensaios de flotação: rejeitos acima e concentrado rougher abaixo. (B) Diamantes sintéticos recuperados.

O processo de recuperação do diamante sintético por meio dos métodos de flotação garantiu a seletividade dos cristais de diamante sintético, mostrando-se eficiente. Foi possível constatar a separação bem selecionada dos grãos da massa de resíduo já na primeira etapa do processo.

Vale ressaltar que o resultado apresentado neste estudo está atrelado as características do resíduo coletado. O local da coleta influenciou significativamente no resultado pois atuou como um concentrador natural dos cristais de diamantes sintéticos.

3.7 | Ensaios em Mesa Vibratória, Espiral Humphrey e Concentrador KNelson

Foram realizados alguns ensaios em mesa vibratória complementares, mas os resultados não foram satisfatórios em função da baixa recuperação de diamante no concentrado. Comparados aos estudos realizados por Souza e Vidal (2013), não se obteve taxas de recuperação consideravelmente superiores a esses estudos.

Foram também realizados testes exploratórios em espiral Humphrey e concentrador KNelson, porém os resultados não se mostraram satisfatórios uma vez que o produto apresentou baixo enriquecimento. Contudo, se faz necessário a realização de estudos mais aprofundados para se concluir sobre a viabilidade técnica no aproveitamento dos diamantes presentes no FIBRO por meio dessas técnicas.

3.8 | Separação em Meio Denso

Após a flotação do material, com objetivo de aumentar o teor de diamante no concentrado, foi realizada uma separação em meio denso. Segundo Lins (2018), a concentração em meio denso consiste na separação dos minerais de diferentes densidades, através de um meio com densidade intermediária à dos minerais.

Neste estudo, o meio denso utilizado foi o líquido denso orgânico denominado Bromofórmio, que apresenta densidade igual a $2,89 \text{ g/cm}^3$, enquanto o diamante possui densidade de aproximadamente $3,6 \text{ g/cm}^3$. Na Figura 16 é possível visualizar o ensaio de separação em meio denso. Na Figura 17 pode-se visualizar os diamantes recuperados durante o estudo.



Figura 16. Ensaio de meio denso para concentração do diamante.



Figura 17. Diamantes sintéticos concentrado após os ensaios.

3.9 | Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Foi realizado o imageamento por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das faces de diamantes novos e recuperados com o objetivo de avaliar a qualidade dos diamantes recuperados. A técnica do MEV consiste na exploração da superfície amostral, através da utilização de um feixe de elétrons que é gerado a partir de um filamento ou cristal, que ao ter contato com a superfície, transmite um sinal detector a uma tela catódica, cujo sua varredura está sincronizada com o feixe incidente. A resolução de boa qualidade da imagem produzida, se dá pela utilização de lentes condensadoras, que torna o diâmetro do feixe de elétrons o menor possível. Na primeira coluna da Figura 18 são apresentados os diamantes após os processamentos de recuperação, enquanto na segunda coluna os diamantes de fábrica.

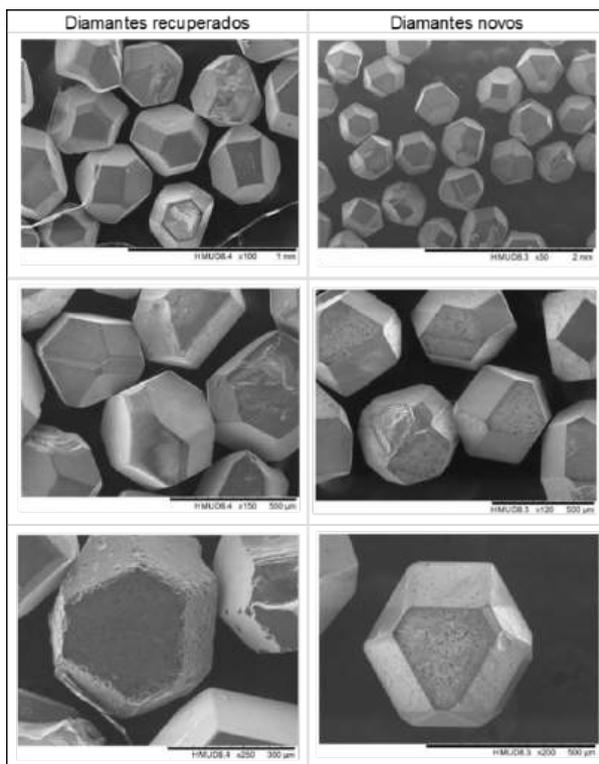


Figura 18. Imagem do MEV para grãos de diamantes novos e recuperados.

Após a realização do imageamento, através do MEV, das pérolas de diamantes, foi constatado que, mesmo após o processo de recuperação, os diamantes tendem a manter suas características intactas, possibilitando sua utilização em novas aplicações. Nota-se que as faces apresentam poucos fraturamentos e o hábito tende a forma dodecaédrica. Dessa forma os resultados do MEV mostram que há grande maioria dos diamantes recuperados continuam preservados.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das tecnologias de processamento para o aproveitamento de diamantes sintéticos provenientes de resíduos de teares multifio é promissor e possui um grande potencial dentro do contexto da economia circular. A concentração dos materiais nos resíduos depositados no aterro e coletados após o filtro-prensa foi significativamente menor quando comparada aos materiais oriundos da coletora do expurgo do multifio. Isso ocorre porque os resíduos no aterro e filtro-prensa contêm misturas de outras fontes, como resíduos do polimento de chapas e marmoraria. Além disso, o fenômeno gravimétrico facilita a concentração dos diamantes na caixa coletora, evitando seu carreamento com os finos para a próxima etapa de separação sólido-líquido.

Foram testados diversos métodos de concentração mineral, destacando-se os métodos de concentração gravítica como mesa vibratória, espiral de Humphrey e concentrador Knelson. No entanto, os resultados obtidos com esses processos não foram satisfatórios, tanto para amostras de granito quanto para amostras de quartzito. Ensaios de separação magnética com resíduos de quartzito também não foram eficientes. As análises de DRX indicaram baixa eficiência na determinação de diamantes sintéticos devido à baixa concentração desse material nos produtos não magnéticos.

A utilização industrial dos resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais ainda está em fase inicial, apesar de seu grande potencial. É fundamental buscar formas de reaproveitar esses subprodutos de maneira lucrativa e ambientalmente sustentável. Durante o estudo dos diversos processos minerais, observou-se a

presença de partículas indesejadas nos produtos concentrados, o que exigiu etapas adicionais de purificação para avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento do FIBRO.

A rota de processamento por flotação foi a que apresentou melhores resultados na recuperação dos diamantes. Esse método mostrou-se eficiente do ponto de vista técnico e pode ser replicado em outros cenários. Contudo, nem todas as amostras de resíduos coletadas apresentaram resultados satisfatórios. Apenas a amostra coletada no primeiro tanque do sistema de tratamento de água de uma indústria mostrou-se promissora, sugerindo a necessidade de estudos mais detalhados e com maior amostragem em outras empresas.

Dessa forma, abre-se caminho para o desenvolvimento de uma nova linha industrial no setor de rochas ornamentais, especialmente na recuperação de diamantes sintéticos do FIBRO de rochas graníticas, que apresentam viabilidade técnica e econômica. Futuramente, com o aprimoramento das técnicas e a adição de novas metodologias de processamento, será possível recuperar mais produtos desses resíduos.

5 | CONCLUSÕES

O setor de rochas ornamentais ainda possui grande potencial para inovações em várias etapas da cadeia produtiva, especialmente no que diz respeito ao aproveitamento e agregação de valor aos resíduos do FIBRO. A mineração de resíduos já é praticada em alguns setores da indústria mineral, e este projeto demonstra uma nova possibilidade para o desenvolvimento de uma economia circular.

Dentre os processos estudados, a flotação foi o método mais indicado para a obtenção de diamantes sintéticos presentes em resíduos de teares multifio diamantados, especialmente em amostras de granito. Foi possível também identificar as faixas granulométricas com maior concentração de diamantes e os reagentes de flotação mais eficazes para a separação dos minerais de interesse.

Contudo, se faz necessário o aprofundamento da investigação a partir da análise dos diversos outros fatores que influenciam os processos de recuperação do FIBRO. Principalmente no que tange aos fenômenos de concentração do diamante durante as etapas que antecedem o descarte do resíduo, o que pode influenciar no ponto mais eficiente de coleta.

Portanto, recomenda-se a realização de estudos detalhados para identificar os locais de coleta de resíduos mais promissores, testar reagentes de flotação mais avançados e ecologicamente corretos e realizar testes em escala piloto para definir os parâmetros operacionais mais eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C.J. Obtenção e caracterização de pérolas autossoldantes no sistema Fe-Cu-Co-P para fabricação de fio diamantado. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes - RJ. 2016.

ALMEIDA, K.M. et. al. Estudo bibliográfico da aplicação dos resíduos de rochas ornamentais. Série Tecnologia Ambiental - CETEM/MCTI. Rio de Janeiro - RJ. 2023.

ALMEIDA, L.L.P. Desenvolvimento de matrizes metálicas no sistema Ni-FeCu-Sn com sditivos para aplicação em serras de corte de rochas ornamentais. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 151p. 2012.

ALMEIDA, P.F; VIDAL, F.W.H. Avaliação da recuperação de diamantes do resíduo de serragem em teares multifio. In: VIII Jornadas do Programa de Capacitação Institucional, CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.

ALVES, D.T; VIDAL, F.W.H.; ALMEIDA, P.F. Flotação de diamantes sintéticos provenientes do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. In: Anais da Jornada de Iniciação Científica, 29. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

ARGÜELLES - DÍAZ, A.; TABOADA - CASTRO, J.; GARCÍA - BASTANTE, F. & ARAÚJO - FERNÁNDEZ, M. Effects of flotation variables on feldspathic sand concentration. Dyna, 81(183), 132. Doi:10.15446/Dyna.V81n183.36287. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS. Estudo da competitividade brasileira no setor de rochas ornamentais e de revestimento. In: Estratégia para uma política nacional de desenvolvimento setorial. Brasília, DF, Brasil, ISBN: 978-85-45530-00-8. 166p. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS. Balanço do setor brasileiro de rochas ornamentais e de revestimento em 2023. Informe 01/2024. Brasília - DF. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT-NBR 10.007/2004. Amostragem de resíduos sólidos. Publicada em 05/2004.

CAMARA, G.R. et al. Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem – Parte I. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Série Rochas e Minerais Industriais, 30. 71p. 2021.

EGRAMPHONTE, G.; VIDAL, F.W.H. ALMEIDA, P.F. Caracterização química do resíduo de serragem em teares multifio para fins de recuperação dos diamantes sintéticos em Espiral de Humphreys. In: Anais da Jornada de Iniciação Científica, 28. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil. p.59-63. 2020.

EGRAMPHONTE, G.; VIDAL, F.W.H.; SILVEIRA, L.L.L. Análise qualitativa dos diamantes oriundos dos resíduos de teares multifio para fins de reaproveitamento. In: Anais da Jornada de Iniciação Científica, 27. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.

KONSTANTY, J.S. BACZEK, E.; ROMANSKI, A.; TYRALA, D. Wear-resistant iron-based Mn–Cu–Sn matrix for sintered diamond tools. Powder Metallurgy, DOI: 10.1080/00325899.2017.1379737. 2017.

KONSTANTY, J.S. Sintered diamond tools – the past, present and future. Archives of Metallurgy and Materials. DOI: 10.24425/amm.2021.135896. 2021.

LINS, F.A.F. Concentração gravítica. In: LUZ, A.B.; FRANÇA, S.C. A.; BRAGA, P.F.A. Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro/RJ, Brasil: Centro de tecnologia Mineral – CETEM/MCTIC. Cap. 6, p.275-300. 2018.

MACHADO, D.S. Desenvolvimento de um compósito diamantado com Matriz metálica à base de níquel. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2013.

MOREIRA JUNIOR, V. Fabricação de pérolas diamantadas para teares de multi-fios. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes - RJ. 2018.

MOREIRA JUNIOR, V. Processamento e caracterização de pérolas diamantadas de fios diamantados. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil, 166p., 2013.

OLIVEIRA, L.J. Processamento e caracterização do sistema Fe-Cu-diamante para uso em pérolas de fios diamantados. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, 166p., 2005.

OLIVEIRA, L.J. Um novo mecanismo de desgaste de compósitos metal-diamantes obtidos por metalurgia do pó. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2009.

OOSTHUIZEN, D.J.; LE ROUX, J.D., & CRAIG, I.K. A dynamic flotation model to infer process characteristics from online measurements. *Minerals Engineering*, 167, 106878. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106878. 2021.

PONCIANO, V.M.; BAHIENSE, A.V., ALMEIDA, P.F. de; SOPELETTO, M.V.S.; SAGRILLO, V.P.D. & OLIVEIRA, J.R. de. Recovery of synthetic diamonds from fines of natural stones processing. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(2), e07761. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-159>. 2024.

PORPHÍRIO, N.H.; BARBOSA, M.I.M.; BERTOLINO, L.C. Caracterização mineralógica de minérios parte I. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro/RJ: CETEM/MCT. p. 57-84. 2010.

SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B; FRANÇA, S.C.A. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A.B.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. Tratamento de Minérios. 6.ed. Rio de Janeiro/RJ: CETEM/MCTIC. Cap. 8, p.341-379. 2018.

SMAR, V.D., KLIMPEL, R.R. & APLAN, F.F. Evaluation of chemical and operational variables for the flotation of a copper ore Part I – Collector concentration, frother concentration, and air flow rate. *International Journal of Mineral Processing*, 42(3-4), 225-240. DOI:10.1016/0301-7516(94)00029-8. 1994.

SOUZA, D.V.; VIDAL, F.W.H. Análise da recuperação do diamante oriundo do resíduo de teares multifio. In: Anais da jornada de Iniciação Científica, 21. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

SOUZA, D.V.; VIDAL, F.W.H.; CASTRO, N.F. Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de granitos comerciais. In: Anais da Jornada de Iniciação Científica, 20. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

TONOLLI, L. VIDAL, F.W.H. Estudo de processamentos tecnológicos, com ênfase em flotação, para o aproveitamento de diamantes sintéticos oriundo dos resíduos de teares multifio. In: Anais da Jornada de Iniciação Científica 30, CETEM-MCTI, Rio de Janeiro, Brasil, 2022.

VIDAL, F.W.H. Estudo dos elementos abrasivos de fio diamantado para a lavra de granitos do Ceará. Tese de Doutorado, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, departamento de Eng. de Minas. 173 p., 1999.

VIDAL, F.W.H. et al. Lavra de rochas ornamentais. In: Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Cap. 4, p.155-257. 2014.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2023, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 380 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

Últimos números da Série Tecnologia Mineral

STM-104 - **Tecnologias de extração de lítio de pegmatitos**. Gabriely Fornazier Brunhara e Paulo Fernando Almeida Braga, 2021.

STM-103 - **Inovações tecnológicas para o tratamento dos rejeitos de carvão visando a recuperação de áreas degradadas**. Zuleica Carmen Castilhos, Ricardo Gonçalves Cesar, Silvia Gonçalves Egler, Renata Alamino, Danielly de Paiva Magalhães, Bruna Alves Pinheiro, Rafael Oliveira Dantas, Mariana Vezzone Tosta Rabela, Aline Freire Serrano, Claudio Luiz Schneider, 2021.

STM-102 - **Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas – O estado da arte**. Tamara Azevedo Schueler, Marcelo de Lucas Dourado e Andréa Camardella de Lima Rizzo, 2019.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 46 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgicos, químico e de materiais.