



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



HUMBERTO HITHELLI SILVA PORTO

**SELETIVIDADE DA FLOTAÇÃO ANIÔNICA DE QUARTZO E CALCÁRIO
DOLOMÍTICO VIA DEPRESSORES ALTERNATIVOS**

OURO PRETO

2026

HUMBERTO HITHELLI SILVA PORTO

**SELETIVIDADE DA FLOTAÇÃO ANIÔNICA DE QUARTZO E CALCÁRIO
DOLOMÍTICO VIA DEPRESSORES ALTERNATIVOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz

Coorientador: M. Sc. Jorge Carlos Guerrero Vargas

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P853s Porto, Humberto Hithelli Silva.

Seletividade da flotação aniônica de quartzo e calcário dolomítico via depressores alternativos. [manuscrito] / Humberto Hithelli Silva Porto. - 2026.

89 f.: il.: color., gráf., tab.. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.

Coorientador: Me. Jorge Carlos Guerrero Vargas.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Flotação. 2. Calcinação (Metalurgia). 3. Calcário. 4. Quartzo. I. Luz, José Aurélio Medeiros da. II. Vargas, Jorge Carlos Guerrero. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.765.061

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Humberto Hithelli Silva Porto

Seletividade da flotação aniônica de quartzo e calcário dolomítico via depressores alternativos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia de minas

Aprovada em 10 de fevereiro de 2026.

Membros da banca

Dr. José Aurélio Medeiros da Luz — Universidade Federal de Ouro Preto
M. Sc. Jorge Carlos Guerrero Vargas — Universidade Federal de Ouro Preto
M. Sc. Brenno Fernandes Santos Vargas — Universidade Federal de Ouro Preto

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2026, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1064032** e o código CRC **C8AB4E6B**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002360/2026-81

SEI nº 1064032

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

Dedico este trabalho, e todo o esforço empregado ao longo da realização do curso, à minha filha Giulia, que com seu nascimento trouxe amor, alegria e um novo sentido à minha vida. Dedico também à minha esposa, pelo apoio incondicional, pela força e dedicação à nossa família, e por jamais medir esforços para me ajudar, especialmente nos momentos de maior dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor meu Deus, Deus de Abraão, de Isaque e de Jacó, pela vida, pela saúde, pela proteção diária e pela sabedoria concedida ao longo dessa caminhada. Sou grato por Sua fidelidade, misericórdia e por jamais me desamparar, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha mãe, que nunca mediu esforços para me ajudar em tudo o que precisei, sendo exemplo de amor, dedicação e perseverança. Ao meu pai, pelos conselhos, pela força e pelas constantes orações. À minha avó Valtemita, por todo o amor, carinho e cuidado.

À minha esposa Thamiris, meu alicerce e maior incentivadora, que sempre esteve ao meu lado, me fortalecendo e sendo minha motivação desde o início dessa jornada; sem seus sábios conselhos, eu não teria chegado até aqui. À minha filha Giulia, que alegrou todos os meus dias com seu carinho e com o doce “Benção, papai?”, trazendo leveza, amor e sentido a cada etapa dessa conquista.

Agradeço ao meu tio Hernane, por todo ensinamento, cuidado e suporte. Aos meus irmãos da Serigy, pela parceria, pelas boas prosas, risadas e grandes ensinamentos compartilhados. Ao Gaspar, pela parceria, paciência e boa conversa. À Nadir, pelos conselhos, cuidado e carinho. Às minhas queridas irmãs da Ohana, por todo amor, carinho e pelas risadas que tornaram a caminhada mais leve. Aos meus irmãos de Ibiajara, pelo suporte, companheirismo e parceria nessa importante etapa da minha vida.

Agradeço a oportunidade de trabalhar com meu orientador Jota, com meu coorientador Guerrero Vargas e com o Toninho, que, além de amigos, foram fundamentais para minha formação acadêmica, contribuindo de forma significativa com conhecimento e experiência. Agradeço também a todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia de Minas, pela valiosa contribuição à minha formação.

Por fim, agradeço à Gloriosa Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela educação pública, gratuita e de qualidade, e à Fundação Gorceix, pelo incentivo e importante contribuição ao longo da minha graduação.

*“E tudo o que fizerem, seja em palavra,
seja em ação, façam em nome do Senhor
Jesus, dando por ele graças a Deus Pai.”*

Colossenses 3:17.

RESUMO

Os minerais carbonáticos, como a calcita e a dolomita, possuem ampla aplicação industrial, destacando-se na produção de cimento, cal, refratários e insumos agrícolas e metalúrgicos. Contudo, sua exploração e beneficiamento são desafiados pela presença de quartzo, considerado contaminante, que compromete a qualidade do produto e eleva os custos operacionais. Este trabalho caracteriza uma amostra de calcário e avalia a eficiência da separação entre carbonatos e quartzo por meio de microflotação reversa em célula de Fuerstenau sob diferentes faixas de potencial hidrogeniônico (pH) como, 6,16, 7,10, 8,14 e 9,11, com foco na remoção de impurezas silicosas que reduzem o valor industrial dos carbonatos. O estudo utiliza o oleato de sódio como reagente coletor e testa o alginato de sódio e o efluente de pinhão (*Araucária angustifolia*) como agentes depressores e compara seus desempenhos. A metodologia abrange a preparação das amostras por meio de processos de fragmentação, moagem e peneiramento, seguida por caracterização física, química, mineralógica e térmica. O estudo caracteriza a amostra carbonática por ensaios de picnometria, difratometria de raios X, calcinação em forno mufla e análise termogravimétrica, e confirma a predominância de dolomita em relação à calcita. A análise termogravimétrica registra uma perda de massa de 47,75%, confirmando a natureza carbonatada do mineral como calcário dolomítico. Nos ensaios de microflotação, identifica-se que o sistema sem depressor opera com maior eficiência em flotação direta sob pH levemente ácido. Com a introdução de depressores, o alginato de sódio demonstra alta seletividade e recuperação metalúrgica na flotação reversa, especialmente nos valores de pH de 8,14 e 9,11. O efluente de pinhão atua de forma eficaz como depressor alternativo, embora apresente desempenho inferior em relação ao alginato. O estudo conclui que a variação do pH exerce influência determinante na seletividade do processo. O trabalho ratifica a aplicação de reagentes biodegradáveis no beneficiamento de minerais carbonatados, possibilitando a remoção eficiente de contaminantes silicosos e a redução de custos operacionais.

Palavras-chave: calcário dolomítico; calcinação; microflotação reversa; oleato de sódio; quartzo.

ABSTRACT

Carbonate minerals such as calcite and dolomite have wide industrial applications, especially in the production of cement, lime, refractories, and agricultural and metallurgical inputs. However, their exploitation and processing are challenged by the presence of quartz, considered a contaminant, which compromises product quality and increases operational costs. This work characterizes a limestone sample and evaluates the efficiency of separation between carbonates and quartz by reverse microflotation in a Fuerstenau cell under different pH ranges (6.16, 7.10, 8.14, and 9.11), focusing on the removal of siliceous impurities that reduce the industrial value of carbonates. Sodium oleate is used as a collector, while sodium alginate and *Araucaria angustifolia* seed effluent are tested as depressant agents and their performances are compared. The methodology includes sample preparation through fragmentation, grinding, and sieving, followed by physical, chemical, mineralogical, and thermal characterization. The carbonate sample is characterized by pycnometry, X-ray diffraction, muffle furnace calcination, and thermogravimetric analysis, confirming the predominance of dolomite over calcite. Thermogravimetric analysis records a mass loss of 47.75%, confirming the carbonated nature of the mineral as dolomitic limestone. Microflotation tests indicate that the system without depressant shows higher efficiency in direct flotation under slightly acidic pH. With the addition of depressants, sodium alginate demonstrates high selectivity and metallurgical recovery in reverse flotation, especially at pH 8.14 and 9.11. The seed effluent acts effectively as an alternative depressant, although with lower performance than alginate. The study concludes that pH variation exerts a decisive influence on process selectivity. The results support the application of biodegradable reagents in carbonate mineral processing, enabling efficient removal of siliceous contaminants and reduction of operational costs.

Keywords: dolomitic limestone; calcination; reverse microflotation; sodium oleate; quartz.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Quarteamento manual. -----	18
Figura 2 – Sistema esquemático da termobalança. -----	19
Figura 3 – Termograma obtido da decomposição de calcário e dolomita durante a calcinação sob N ₂ puro (a) à pressão atmosférica. -----	20
Figura 4 – Termograma obtido da decomposição de calcário e dolomita durante a calcinação sob CO ₂ puro (b) à pressão atmosférica. -----	21
Figura 5 – Termogramas obtidos da decomposição de dolomita e calcário durante a calcinação à pressão atmosférica sob misturas de gases CO ₂ /N ₂ em diversas concentrações de CO ₂ , conforme indicado. -----	22
Figura 6 – Diagrama esquemático do forno AZBE100. -----	25
Figura 7 – Fluxograma do circuito de obtenção da cal com cabe em carbonato de cálcio dolomítico. -----	28
Figura 8 – Calcinação da cal.-----	29
Figura 9 – Flotação de calcita com oleato de sódio em função do pH para várias concentrações do quebracho. -----	33
Figura 10 – Célula de Fuerstenau. -----	36
Figura 11 – Ensaio na célula de Fuerstenau. -----	36
Figura 12 – Máquina de flotação (modelo Wemco).-----	37
Figura 13 – Máquina de flotação (modelo Galigher). -----	38
Figura 14 – Arranjo de células de flotação. -----	38
Figura 15 – Circuito de flotação. -----	39
Figura 16 – Esquema de um circuito completo de flotação. -----	39
Figura 17 – Flotabilidade do quartzo por oleato (à esquerda) e por tanino e oleato em função do pH.-----	40
Figura 18 – Flotabilidade da dolomita por oleato (à esquerda) e por tanino e oleato em função do pH.-----	40
Figura 19 – Efeitos principais para flotabilidade da calcita. (considerações: na proporção 0 significa 100% oleato e o 100 indica 100% palmitato). -----	41
Figura 20 – Efeitos principais para flotabilidade da dolomita. (considerações: na proporção 0 significa 100% oleato e o 100 indica 100% palmitato). -----	42
Figura 21 – Flotabilidade da dolomita em relação ao pH. -----	43
Figura 22 – Amostras utilizadas neste estudo. -----	45

Figura 23 – Moinho.	45
Figura 24 – Corpos moedores de porcelana.	46
Figura 25 – Peneirador.	46
Figura 26 – Alginato diluído em água destilada à concentração de 1%.	48
Figura 27 – Extrato sólido concentrado de pinhão.	49
Figura 28 – Ilustração esquemática do método de picnometria para determinação de massa específica.	51
Figura 29 – Difratorômetro.	51
Figura 30 – Sistema de microflotação em célula de Fuerstenau.	53
Figura 31 – Difratoograma do calcário dolomítico.	63
Figura 32 – Termograma do dolomito.	65
Figura 33 – Flotabilidade do dolomito para todos os ensaios de microflotação.	65
Figura 34 – Flotabilidade do quartzo para todos os ensaios de microflotação.	66
Figura 35 – Resultados de picnometria de todos os ensaios de microflotação (flotado).	67
Figura 36 – Resultados de picnometria de todos os ensaios de microflotação (afundado). ---	67
Figura 37 – Resultados de PPC de todos os ensaios de microflotação (flotado).	68
Figura 38 – Resultados de PPC de todos os ensaios de microflotação (afundado).	68
Figura 39 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (afundado).	71
Figura 40 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (flotado).	72
Figura 41 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação com alginato (afundado).	73
Figura 42 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação com efluente de pinhão (afundado).	74
Figura 43 - Perdas por calcinação em duplicatas com uso do alginato (afundado).	75
Figura 44 - Perdas por calcinação em duplicatas com uso do alginato (flotado).	75
Figura 45 - Perdas por calcinação em duplicatas sem uso de depressor (afundado).	76
Figura 46 - Perdas por calcinação em duplicatas sem uso de depressor (flotado).	76
 Quadro 1 – Principais fatores que podem afetar as medidas de ATG/TGD.	 20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas e químicas da cal.	26
Tabela 2 – Resultado de flotabilidade com planejamento fatorial com ponto central em quintuplicata.	41
Tabela 3 – Quarteamento: calcário dolomítico.	60
Tabela 4 – Quarteamento: quartzo.	60
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de picnometria: calcário dolomítico.	61
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de picnometria: quartzo.	62
Tabela 7 – Perda ao fogo (calcinação do calcário dolomítico).	64
Tabela 8 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (afundado).	70
Tabela 9 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (flotado).	71
Tabela 10 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação com alginato (afundado).	72
Tabela 11 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação com efluente de pinhão (afundado).	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
Objetivo geral.....	14
Objetivos específicos.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
Calcário dolomítico (dolomito).....	16
Calcita.....	16
Dolomita	16
Suas aplicações na indústria	17
Processamento.....	17
Quarteamento e Homogeneização.....	18
Caracterização tecnológica	19
Termobalança e análise termogravimétrica (ATG).....	19
Difratometria de raios X (DRX).....	23
Calcinação	23
Cal virgem	26
Deciptação e Sinterização	29
Procedimentos analíticos para quantificar óxidos	30
Reagentes.....	30
Coletores.....	30
Ácido Oleico.....	30
Depressores.....	31
Alginato de sódio.....	31
Tanino (pinhão de <i>Araucária angustifolia</i>)	31
Mecanismos da flotação e microflotação	33
Célula de Fuerstenau	35

Máquinas e circuito de flotação industrial	37
Flotabilidade de carbonatos e quartzo	39
4. METODOLOGIA.....	44
Preparação das amostras	44
Preparação dos reagentes.....	46
Caracterização das amostras	49
Picnometria.....	49
Difratometria de raios X	51
Calcinação por forno mufla	52
Análise termogravimétrica (ATG)	52
Ensaio de microflotação.....	52
Determinação de parâmetros	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
Quarteamento	60
Preparação dos reagentes.....	61
Picnometria	61
Difratometria de raios X (DRX).....	62
Calcinação por forno mufla	63
Análise termogravimétrica (ATG)	64
Ensaio de microflotação.....	65
Determinação de parâmetros	69
Ensaio de microflotação sem depressor	70
Ensaio de microflotação com depressor alginato.....	72
Ensaio de microflotação com efluente de pinhão como depressor	73
6. CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS	79

INTRODUÇÃO

Na indústria, os minerais carbonáticos têm ampla aplicabilidade. A calcita é utilizada como matéria-prima fundamental na fabricação de cimento e cal, assim como para corrigir a acidez do solo na agricultura, e entre outras aplicações. A dolomita, além de uso semelhante, é empregada em processos metalúrgicos, na produção de refratários e como fonte de óxido de magnésio (Sampaio e Almeida, 2008).

Entretanto, na lavra de depósitos carbonáticos e no beneficiamento existe o desafio da associação com minerais de ganga, em especial o quartzo (SiO_2). O quartzo pode ser considerado um contaminante ou rejeito quando presente em concentrações indesejadas nas matérias-primas, afetando diretamente os custos de beneficiamento e impactando a qualidade do produto, conforme as exigências de cada indústria (Christofolletti *et al.*, 2003).

Por essa razão, os ensaios de microflotação fornecem informações essenciais para o desenvolvimento de rotas de beneficiamento mais seletivas, reduzindo custos e otimizando processos industriais. A flotação por espuma é um processo físico-químico que consiste em separação de minerais valiosos da ganga no qual reagentes químicos são utilizados para alterar seletivamente a superfície do mineral de interesse, conferindo-lhe caráter hidrofóbico. Essa condição favorece a interação com as bolhas de ar geradas no sistema, possibilitando o seu transporte até a superfície, enquanto os minerais não desejados permanecem com afinidade pela fase aquosa (hidrofílicos) e se mantêm dispersos na polpa (Fuerstenau *et al.*, 2007). Em determinados contextos operacionais e demanda, esse mecanismo pode ser invertido, como ocorre nos processos de flotação reversa, nos quais os minerais de ganga são flotados preferencialmente (Drzymała, 2006).

Logo, o presente trabalho propõe caracterizar uma amostra de carbonato e analisar o comportamento em ensaios de microflotação reversa, como mineral de interesse, e do quartzo como contaminante, visando avaliar os resultados de eficiência da seletividade desses minerais frente à utilização de reagentes em combinações e faixas de pH diferentes.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Caracterizar a amostra de calcário se dolomítico ou calcítico e avaliar a eficiência da microflotação reversa entre carbonato, como mineral de interesse, e quartzo como mineral de ganga, em célula de Fuerstenau, utilizando oleato de sódio como coletor e, alginato e efluente de pinhão (*Araucária angustifolia*) como agentes depressores, analisando o desempenho e a seletividade do processo.

Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) Preparar as amostras de quartzo e calcário em faixas granulométricas adequadas aos ensaios de microflotação, compreendidas entre as peneiras passante e retida, 65 malhas (0,208 mm) e 200 malhas (0,074 mm), respectivamente, por meio de processos controlados (cominuição e peneiramento);
- b) Realizar o quarteamento das amostras, assegurando a representatividade estatística do material e respeitando uma margem de erro máxima de 5% em cada etapa de divisão;
- c) Determinar a massa específica real das amostras por meio de ensaios de picnometria, visando a caracterização física dos minerais estudados;
- d) Promover a secagem das amostras em estufa térmica a 120° C, para remoção de umidade residual e possíveis voláteis superficiais;
- e) Submeter a amostra de calcário ao processo de calcinação em forno mufla, à temperatura de 900° C por 6 horas, com o objetivo de avaliar alterações físico-químicas decorrentes da decomposição térmica, visando a caracterização química;
- f) Realizar ensaios de análise termogravimétrica (ATG) da amostra de calcário, visando identificar eventos de perda de massa e temperaturas características de decomposição de forma mais precisa em atmosfera controlada, visando a caracterização química;
- g) Caracterizar mineralogicamente a amostra de calcário por meio de ensaio de difratometria de raios X (DRX), utilizando radiação Cu-K α , para identificação dos minerais presentes;

- h) Preparar as soluções dos reagentes, o coletor (oleato de sódio) e os agentes depressores (alginato e efluente de pinhão), nas concentrações previamente definidas;
- i) Preparar e ajustar a célula de Fuerstenau e o sistema de flotação, controlando parâmetros operacionais como vazão de ar e condições de agitação;
- j) Preparar e dosar os agentes reguladores de pH (básicos e ácidos) e o espumante, garantindo condições adequadas à seletividade do processo de flotação;
- k) Realizar a pesagem dos produtos obtidos nos ensaios de microflotação e após o processo de calcinação, possibilitando a determinação de parâmetros;
- l) Tratar e analisar os dados experimentais obtidos, por meio de cálculos pertinentes, visando a interpretação crítica dos resultados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Calcário dolomítico (dolomito)

Segundo Santana (2002), calcário é qualquer rocha que possui em sua composição química mais de 50% de carbonato de cálcio ou carbonato de cálcio e magnésio, sendo alguns dos principais minerais a calcita (CaCO_3) e a dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Podendo assumir dois tipos, como calcítico ou dolomítico. O calcário dolomítico (dolomito), composto em maior parte por dolomita, indica uma faixa percentual de Mg entre 10,8 e 19,5%, enquanto o calcítico, grande parte calcita, 2,1 a 10,8% (Boynton, 1980).

Segundo Sampaio e Almeida (2008), o cálcio constituinte dos calcários é oriundo de rochas ígneas, sendo um dos elementos químicos mais comum, estimado em 3 a 4% da crosta terrestre. A formação dos calcários ocorre em bacias oceânicas. Segundo Santana (2002), também se formam nas águas dos rios, lagos e mares, em diversas eras geológicas, por meio dos processos de denudação.

Considera-se que os dolomitos foram formados pela substituição do cálcio pelo magnésio, a partir de elevado teor de sais de magnésio dissolvido nas águas. Teoria atualmente aceita (Sampaio; Almeida, 2008).

Calcita

Hábito cristalino e hexagonal com boa clivagem romboédrica. Dureza 3 (escala Mohs). Massa específica 2,71 g/cm³ a 2,72 g/cm³. Geralmente, ocorre na cor branca ou sem cor (hialino) e coloridas quando contém impurezas (Sampaio e Almeida, 2008; Webmineral, 2025).

Dolomita

Sistema cristalino hexagonal, comumente em cristais romboédricos com faces curvadas. Dureza 3,5 a 4,0. Massa específica 2,80 g/cm³ a 2,90 g/cm³. Geralmente, encontrada nas cores branca e rósea (Sampaio e Almeida, 2008; Webmineral, 2025).

Segundo Sampaio e Almeida (2008), a similaridade entre as propriedades físicas dos minerais (dolomita e calcita) dificulta sua distinção apenas por métodos convencionais. Dessa forma, técnicas complementares de identificação, como análises químicas, difratometria de raios X e microscopia eletrônica, são amplamente empregadas.

Suas aplicações na indústria

Possui ampla aplicabilidade em diferentes segmentos industriais. Entre os principais, destacam-se a construção civil, a agricultura, a siderurgia e a metalurgia de metais não ferrosos, o tratamento de efluentes, a fabricação de produtos químicos e alimentícios, além de sua utilização nas indústrias de papel e celulose, óleos, borrachas e tintas, bem como no controle e na remoção de óxidos de enxofre (Pinto, 2023).

Leal *et al.* (2008), ao avaliarem a aplicação de calcário na implantação do sistema plantio direto em área de Cerrado, verificaram que a calagem (prática agrícola para corrigir a acidez no solo) promove alterações significativas nos atributos químicos do solo, com elevação do pH, aumento da saturação por bases e redução da acidez. Os autores também destacam que a associação da aplicação de calcário com o uso de culturas de cobertura contribui para a melhoria das condições de fertilidade do solo, favorecendo o desempenho das culturas agrícolas.

A transformação de calcário em cal um processo central para abastecer setores como a construção civil e segmentos químicos. O desenvolvimento dessa cadeia produtiva envolve a extração do calcário, sua calcinação e posterior aplicação em processos industriais que dependem da reatividade e das propriedades físico-químicas da cal produzida, evidenciando sua importância econômica e tecnológica no país (Pereira, 2009).

O que compromete o aproveitamento econômico do calcário são impurezas silicosas, que ocorre como areia, fragmentos de quartzo e, em estado combinado, como feldspato, mica, talco e serpentinito, que produzem efeitos nocivos ao calcário. Para fins metalúrgicos e químicos devem conter menos que 1% de alumina e 2% de sílica (Sampaio; Almeida, 2008).

Por isso, é imprescindível o beneficiamento do calcário para a remoção de impurezas silicosas que comprometem seu aproveitamento econômico e industrial. Processos adequados de concentração permitem adequar o teor de sílica às especificações exigidas pelos setores metalúrgico e químico. Nesse contexto, a microflotação seletiva destaca-se como uma etapa estratégica para a separação eficiente.

Processamento

O beneficiamento depende do uso e especificações do produto. A lavra seletiva, a catação manual, britagem em estágio unitário, peneiramento, flotação e separação magnética, e entre outros, são os métodos usuais, que compete ao especialista o uso cada vez mais prático

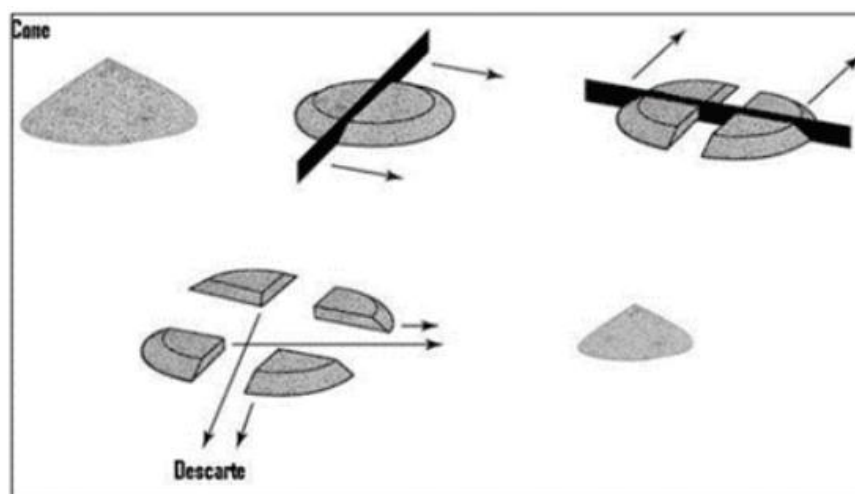
para solucionar as questões de separação e concentração em cada caso (Sampaio; Almeida, 2008).

Quarteamento e Homogeneização

A homogeneização e o quarteamento (preparação de amostras), é necessário e antecedente aos ensaios de caracterização de minerais, minérios, rejeitos e entre outros. Objetivando assegurar a representatividade de uma fração retirada de uma amostra. A homogeneização tem por finalidade distribuir uniformemente os componentes, enquanto o quarteamento divide uma amostra inicial em alíquotas menores em massa. Os métodos mais utilizados são a pilha cônica e o quarteador tipo Jones (Meyer *et al.*, 2024).

No método da pilha cônica (Figura 1), forma-se uma pilha para separar simetricamente em relação ao vértice do cone. O quarteador tipo Jones é um aparelho que separa o material fragmentado em duas alíquotas por meio de calhas inclinadas apontadas em direções opostas (Sampaio *et al.*, 2007).

Figura 1 – Quarteamento manual.



Fonte: Meyer *et al.* (2024).

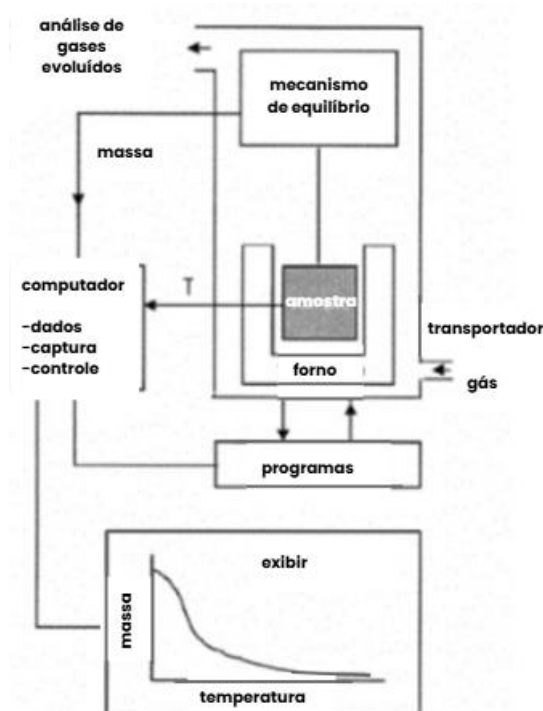
Segundo Meyer *et al.* (2024), em relação aos métodos de pilha cônica e quarteador tipo Jones, utilizados para amostragem, são considerados úteis e que conservam a representatividade, contudo, o aparelho é mais preciso, enquanto o quarteamento manual é mais prático. Schumacher *et al.*, (1990) ressaltou que cinco divisões são suficientes para julgar uma amostra homogeneizada, independentemente do método utilizado.

Caracterização tecnológica

Termobalança e análise termogravimétrica (ATG)

A análise termogravimétrica (ATG) é uma técnica de caracterização térmica que consiste no monitoramento contínuo da variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, utilizando uma termobalança (por vezes referida como analisador termogravimétrico), sob controle da atmosfera que envolve a amostra, como o tipo de gás e pressão. A termobalança é a combinação de uma microbalança eletrônica adequada com um forno, um programador de temperatura e um computador para controle, que permite que a amostra seja simultaneamente pesada e aquecida ou resfriada de maneira controlada, com o registro da massa, da temperatura, dos dados de pressão e do balanço térmico (Figura 2) (Brown, 2001).

Figura 2 – Sistema esquemático da termobalança.



Fonte: Modificado de Brown (2001).

Essa técnica permite identificar fenômenos como, as variações de massa que ocorrem no material devido à volatilização de constituintes, decomposição térmica de minerais, reação de oxidação e redução, entre outros processos (Alves, 2018, *apud* Scalize *et al.*, 2020). A termogravimetria derivada (TGD), por sua vez, é o arranjo matemático, no qual a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo (Denari e Cavalheiro, 2012).

Há diversos fatores relacionados ao equipamento e amostra que podem afetar o resultado do ensaio termogravimétrico (Quadro 1).

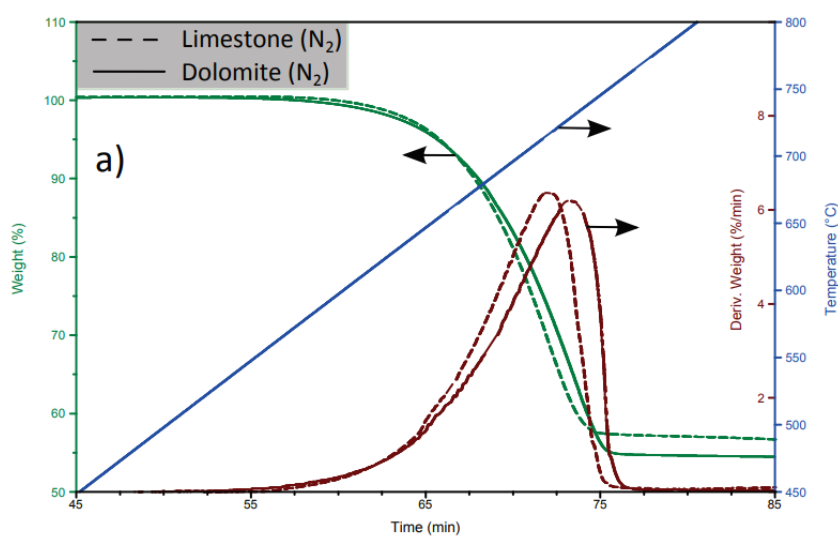
Quadro 1 – Principais fatores que podem afetar as medidas de ATG/TGD.

FATORES INSTRUMENTAIS	FATORES DA AMOSTRA
Razão de aquecimento do forno	Quantidade de amostra
Velocidade de registro	Solubilidade dos gases envolvidos
Atmosfera do forno	Tamanho das partículas e calor de reação
Geometria do suporte de amostra	Empacotamento da amostra
Sensibilidade da balança	Natureza da amostra
Composição do suporte de amostra	Condutividade térmica

Fonte: Adaptado de Denari e Cavalheiro, 2012, *apud* Scalize *et al.* (2020).

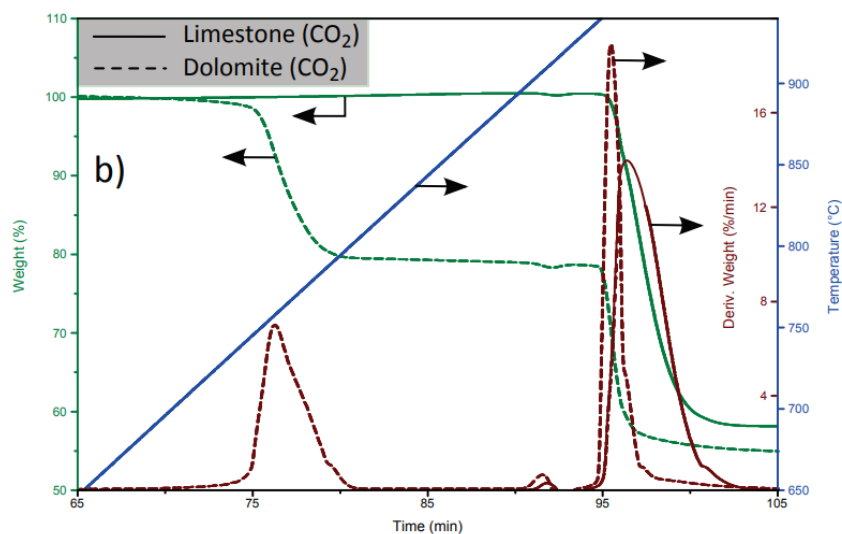
Valverde *et al.* (2015) estudou a decomposição térmica do calcário (*limestone*) e da dolomita (*dolomite*), para atmosfera pura em nitrogênio (N₂) e dióxido de carbono (CO₂), conforme Figura 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 – Termograma obtido da decomposição de calcário e dolomita durante a calcinação sob N₂ puro (a) à pressão atmosférica.



Fonte: Valverde *et al.* (2015).

Figura 4 – Termograma obtido da decomposição de calcário e dolomita durante a calcinação sob CO₂ puro (b) à pressão atmosférica.



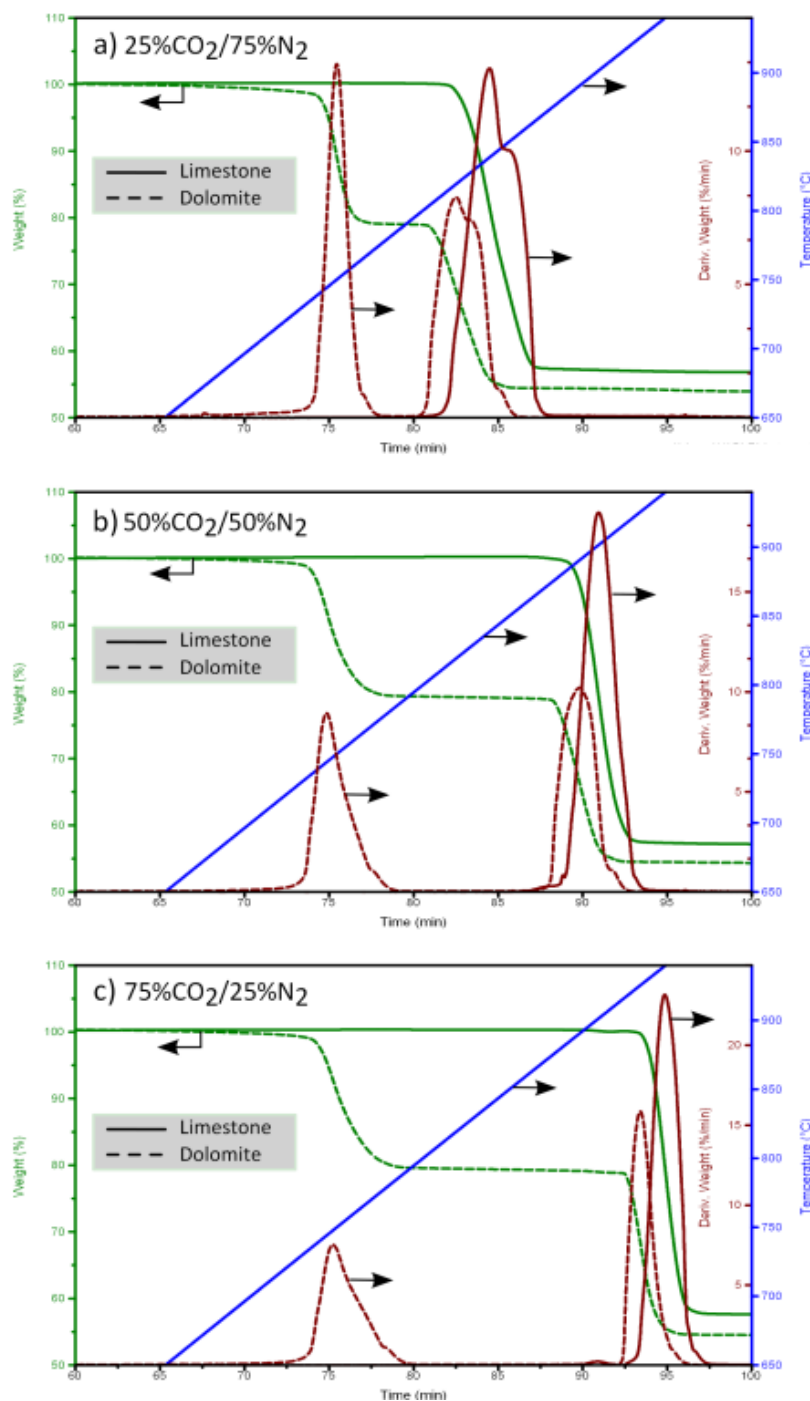
Fonte: Valverde *et al.* (2015).

Conforme Valverde *et al.* (2015), a perda por calcinação das amostras de dolomita e calcário sob atmosfera de nitrogênio puro segue tendências praticamente idênticas (verificada uma elevada repetibilidade a partir de várias medições em amostras diversas nas mesmas condições). Na percepção que se inicia a 550° C e termina em torno de 750° C.

Ainda segundo os autores, sob atmosfera rica em CO₂, a calcinação do calcário e da dolomita ocorre de forma distinta. O calcário inicia a descarbonatação de forma mais lenta e em temperaturas mais elevadas (próximas de 850° C). A dolomita se decompõe em duas etapas, a primeira associada à decomposição do MgCO₃, e a segunda relacionada à descarbonatação do CaCO₃.

Ensaio sob diferentes proporções de CO₂ foram realizados (Figura 5), destaca-se a primeira decomposição da dolomita, à medida que a concentração de CO₂ diminui, essa etapa ocorre em temperaturas mais altas, enquanto para o calcário, a descarbonatação ocorre em temperaturas mais baixas (Valverde *et al.*, 2015).

Figura 5 – Termogramas obtidos da decomposição de dolomita e calcário durante a calcinação à pressão atmosférica sob misturas de gases CO₂/N₂ em diversas concentrações de CO₂, conforme indicado.



Fonte: Valverde *et al.* (2015).

Carvalho (2005) compara o resultado da análise termogravimétrica 47,7286% de PPC para dolomita com os resultados publicados por Shoval (1988) e McCauley e Jonsohn (1981) que pesquisaram amostras muito puras de dolomita para fábricas de refratários, com PPC média de 47%.

Difratometria de raios X (DRX)

A difratometria de raios X (DRX) é uma técnica de caracterização mineralógica utilizada para identificar fases cristalinas presentes em um material. O método baseia-se na interação de um feixe de raios X monocromático com a estrutura cristalina da amostra. Quando os raios X incidem sobre os planos atômicos regularmente espaçados do cristal, ocorre difração construtiva apenas para determinados ângulos, obedecendo à Lei de Bragg, conforme Equação i, (criada por W. H. Bragg (1862-1942) e seu filho W. L. Bragg (1890-1971), dois físicos ingleses) (Cullity; Stock, 2001).

$$\text{Lei de Bragg: } n * \lambda = 2 * d * \sin (\theta) \quad (i)$$

Onde:

n: ordem da difração;

λ : comprimento de onda do raio-X incidente [m];

θ : ângulo de incidência [Graus (°)];

d: distância entre as camadas atômicas paralelas no cristal [m].

Segundo Cullity e Stock (2001), cada mineral possui um arranjo cristalino característico, o que gera um padrão de difratograma único. Assim, a análise das posições e intensidades dos picos no difratograma permite identificar qualitativamente os minerais presentes e, em alguns casos, estimar sua proporção na amostra. A DRX é amplamente empregada em estudos mineralógicos por ser uma técnica não destrutiva, rápida e confiável para identificação estrutural.

Logo, a caracterização tecnológica é fundamental no estudo de carbonatos, pois permite determinar a composição mineralógica com o uso do difratômetro de raios-X (DRX) e compreender o comportamento térmico do mineral utilizando a análise termogravimétrica (ATG). No caso da calcinação, essa etapa é decisiva para avaliar a eficiência da conversão em cal virgem, determinação de teor, impurezas e condições operacionais. Desta forma, a variabilidade dos carbonatos estabelece desafios analíticos que tornam indispensável a integração entre caracterização e estudos térmicos.

Calcinação

A calcinação consiste em um tratamento térmico aplicado principalmente a carbonatos e hidratos, com o objetivo de promover a remoção de CO₂, água e outros gases quimicamente

ligados à estrutura dessas substâncias (Rosenquist, 1983, *apud* Campos *et al.*, 2018). Trata-se de um processo endotérmico em substâncias sólidas objetivando remover voláteis, termólise e reorganização cristalina, amplamente empregado na produção de óxidos (Campos *et al.*, 2018).

A calcinação na indústria é muito significativa, principalmente, na produção da cal, gesso, cimento, alumina e dentre outros. A calcinação é realizada em diferentes tipos de reatores, tais como: forno vertical (forno de cuba), intermitente ou contínuo, forno rotativo e forno de leito fluidizado (Trajano, 1969, *apud* Campos *et al.*, 2018).

Soares (2007) classifica a cinética de calcinação como complexa, devido diversos fatores, como concentração de dióxido de carbono (causa bloqueio da reação), distribuição granulométrica das partículas (afeta a transferência de calor) e a presença de impurezas (afeta a termólise do calcário).

Segundo Guimarães (1998), o impacto da calcinação do calcário tem sido estudado por décadas, condições como, temperatura, composição química, composição física, cristalinidade, impurezas, granulometria, presença de pó/finos e má distribuição do material, dificultam o contato do ar quente na extensão do forno, alterando a proporção química entre o cálcio e o magnésio e influenciando diretamente no produto.

Cunha *et al.* (1949) propõe utilizar uma fase gasosa para transferência de calor e arraste dos produtos gasosos gerados na decomposição para melhorar o desempenho do processo, com destaque para o controle da pressão do CO₂.

Heck (2017) classifica a taxa de conversão na calcinação dos carbonatos para partículas maiores do que 40 mm, que é governada pelas mesmas leis das reações controladas pela difusão, sendo o tempo de decomposição proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e a taxa de conversão inversamente proporcional ao diâmetro da partícula. Considerando que outros fatores como, porosidade aberta na partícula, trincas e entre outros, podem ter relevância no processo de calcinação.

Lima (2016) descreve as fases do aquecimento dos calcários, de acordo com o tipo de forno e as características da carga. Estas fases são:

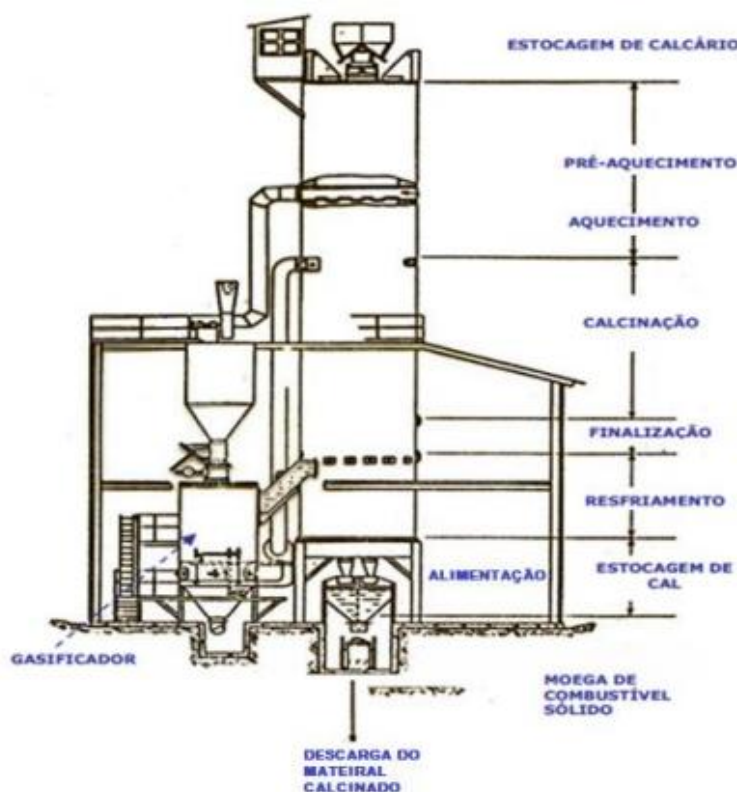
- (i) pré-aquecimento: em pré-aquecedores, na parte superior dos fornos;
- (ii) aquecimento: seguindo especificações adequadas, até atingir a temperatura de decomposição;

(iii) calcinação: atingida a temperatura de decomposição, dá-se à carga um tempo de permanência para transformação completa do calcário em cal virgem.

(iv) resfriamento da cal virgem: geralmente por intermédio de ar insuflado (ar secundário de combustão).

O diagrama esquemático do forno AZBE100 (Figura 6), auxilia o entendimento da descrição anterior.

Figura 6 – Diagrama esquemático do forno AZBE100.



Fonte: Paiva *et al.*, 2007, *apud* Lima (2016).

De acordo com Lima (2016), em levantamentos realizados em campo, destacou-se diversos problemas relacionados com a operação dos fornos industriais, causando riscos de calcinações incompletas. O descontrole da temperatura eleva os níveis de CO_2 que agrava pela má operação, com mais de uma descarga do material calcinado por vez, que provoca o descontrole no ciclo do material dentro do forno, (pré-aquecimento, aquecimento e calcinação), gerando a decriptação, sinterização e os vapores H_2O , que inibe o processo de calcinação e aumenta a produção de finos. Para Sampaio e Almeida (2008) o material fino torna mais lento o processo de decomposição, interrompendo o fluxo do CO_2 já liberado, provocando paradas indesejáveis à operação. Observou-se que o aumento do CO_2 não alterou significativamente a

massa do produto para os óxidos de cálcio e magnésio, mas houve variabilidade em termos de composição e cristalinidade devido à diferença dos tempos de exposição das duas composições à temperatura. Considera-se que os fatores decisivos no processo de calcinação estão diretamente relacionados ao procedimento de operação dos fornos e controle de temperatura (Lima, 2016).

Para Sampaio e Almeida (2008), a viabilidade técnica do calcário deve haver um estudo em escala de laboratório e/ou unidade piloto com a finalidade de avaliar as variáveis operacionais e obter os dados necessários ao escalonamento. Pois, há uma relação à produção de cal, estima-se uma média nas práticas industriais de 2,0 t de calcário para 1,0 t de cal produzida.

Cal virgem

O beneficiamento do calcário por meio da calcinação resulta na cal virgem, ou apenas cal, sendo o dolomito bastante utilizado na produção. É um dos produtos mais antigos utilizados pelo homem, obtendo registros de mais de 2000 anos, sendo entre eles a mistura de cal e terra argilosa usada na muralha da China (Carpio *et al.*, 2013). Tufo vulcânico misturado à cal na forma de um cimento foi usado por gregos e romanos. O cimento artificial, Portland, patenteado pelo inglês Joseph Aspdin em 1824, foi obtido pela calcinação de calcário argiloso (Bogue, 1955; Bogue e Gilkey, 1964, *apud* Campos *et al.*, 2018).

Para obtenção da cal, os fornos operam em temperaturas entre 900° e 1200° C, removendo o dióxido de carbono (CO₂) que surge em combinação com os óxidos de cálcio (CaO) e/ou magnésio (MgO), sendo um componente de uso variado, abastecendo vários setores, principalmente aqueles derivados para a construção civil (John *et al.*, 2014).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Normas Brasileiras – NBR 6473/2003 estabeleceu as características físico-químicas, como granulometria, umidade, densidade, reatividade, teores de cálcio e magnésio, perda ao fogo e outros, variáveis de influência direta na qualidade dos cales e são determinadas em laboratórios. A Tabela 1 apresenta as principais características físicas e químicas da cal (Guimarães, 1998).

Tabela 1 - Características físicas e químicas da cal.

Característica	CaO	CaO, MgO
Peso específico	3,2 a 3,4	3,2 a 3,4
Densidade aparente	881 a 963 Kg/m ³	881 a 963 Kg/m ³
Ca presente	71,47%	-
Mg presente	-	25,23%

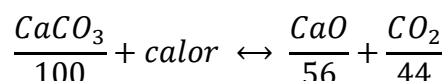
Peso molecular	56	96,3
Calor de formação	151.900 cal/mol	143.750 cal/mol MgO
Neutralização de 100g de H ₂ SO ₄	5,7 g	50 g

Fonte: Adaptada de Guimarães, 1998, *apud* Lima (2016).

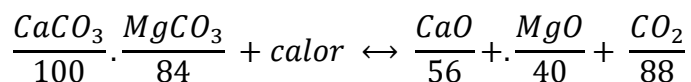
Segundo Sampaio e Almeida (2008), a cal com elevado cálcio tem menos de 5% de MgO. Entretanto, a cal originada de um calcário com elevado teor de magnésio, o produto é conhecido por cal dolomítica. Antigamente, o carbonato de cálcio ou qualquer outro metal transformado em óxido, por efeito do calor, dava-se o nome genérico de cal. Em geral, o efeito do calor ou calcinação ocorre em temperatura próxima àquela de fusão do material, no caso do calcário, na faixa de 900 a 1.000° C.

A calcinação do calcário para produzir cal segue as reações abaixo

- Calcinação do calcário calcítico (CaCO₃) na temperatura entre 1000 e 1300° C.



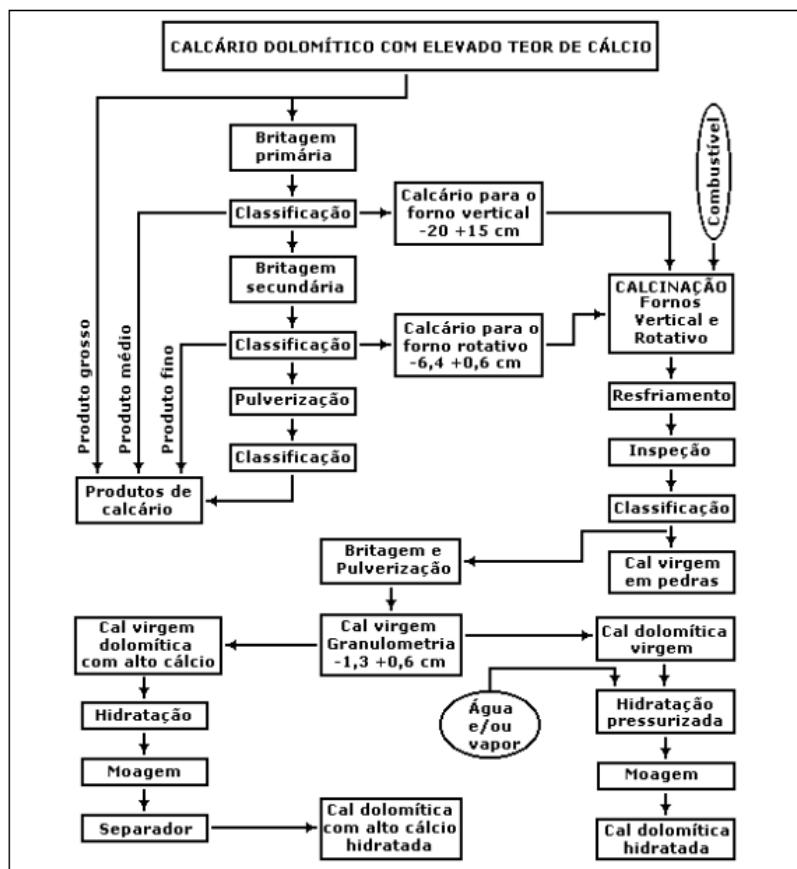
- Calcinação do calcário dolomítico (CaCO₃.MgCO₃) na temperatura entre 900 e 1200° C.



Nessa etapa da calcinação há uma perda de 44% da massa inicial do calcário calcítico, em decorrência da liberação do CO₂. Calcários dolomíticos, essa perda pode atingir o valor de 48% (Sampaio; Almeida, 2008).

O fluxograma do processo para obtenção da cal por meio do calcário dolomítico é apresentado na Figura 7, a seguir.

Figura 7 – Fluxograma do circuito de obtenção da cal com cabe em carbonato de cálcio dolomítico.



Fonte: Freas, 1994, *apud* Sampaio e Almeida (2008).

A cal é um produto instável, ou seja, calcinação reversível, que ao reagir com água, reação exotérmica, resulta na cal hidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, um produto mais estável. A cal hidratada ao reagir com CO_2 resulta no calcário calcítico (CaCO_3), que se precipita (Sampaio; Almeida, 2008).

O processo de hidratar a cal é feita em hidratadores, em produção contínua que transforma os óxidos de cálcio (CaO) ou magnésio (MgO) em hidróxidos, substâncias adequadas para vários mercados, mas, principalmente, para a construção civil (Lima, 2016).

A reatividade da cal é um indicador de sua qualidade e do seu poder de neutralização. Sua determinação baseia-se na neutralização da alcalinidade liberada durante a hidratação do óxido de cálcio com solução de ácido clorídrico (HCl). A norma ABNT NBR 8815 estabelece métodos de ensaio baseados na variação de pH ou em titulação com HCl utilizando fenolftaleína como indicador (ABNT, 1989).

Outro parâmetro relevante na avaliação da qualidade da cal é o teor de óxido de cálcio disponível, definido como a fração de CaO suscetível à hidratação e à formação de hidróxido

de cálcio. Esse parâmetro, determinado conforme a norma ABNT NBR 6473, também reflete a eficiência do processo de calcinação (ABNT, 2003).

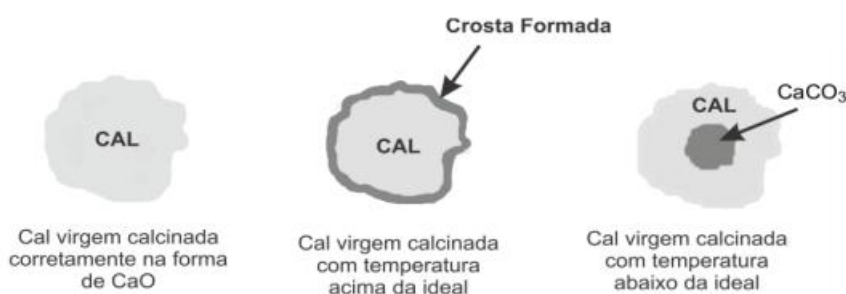
Na indústria metalúrgica, o óxido de cálcio serve para limpeza, reage com as impurezas, como o enxofre que é retirado na escória. Nos processos pirometalúrgicos de altas temperaturas, reage com as impurezas ácidas, por exemplo, nos fornos de fabricação de ferro gusa. Enquanto, a cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é um dos reagentes mais usados para remoção dos íons cálcio e magnésio da água (Sampaio; Almeida, 2008).

Decriptação e Sinterização

Segundo Chen *et al.* (2007), a partir de 950°C , tanto nas calcinações em laboratório quanto no forno AZBE, inicia-se o processo de decriptação e sinterização, principal fator para a redução dos teores, esse fenômeno aumenta o CO_2 e o vapor de H_2O , causando a inibição da reação completa dos óxidos.

Durante a calcinação, o calcário originalmente compacto e denso torna-se mais poroso e reativo em função da liberação de CO_2 de sua estrutura cristalina, o que promove o aumento da área específica. Esse processo pode elevar a porosidade em até 54% e reduzir o volume molar em cerca de 45%, passando de $36,9\text{ cm}^3/\text{mol}$ (CaCO_3) para $16,9\text{ cm}^3/\text{mol}$ (CaO). Em temperaturas elevadas, podem ocorrer fenômenos distintos: a sinterização, caracterizada pelo amolecimento e aglomeração das partículas, resultando no aumento da fração de grãos grossos; e a decriptação, na qual a rápida liberação de gases (CO_2 , H_2O e outros) gera pressão interna suficiente para provocar a fragmentação das partículas e o enriquecimento da fração fina. Este processo, assim como a má calcinação ou tempo de exposição à temperatura elevada maior do que o necessário, resulta em um produto não adequado ou fora da especificação. A Figura 8 apresenta resultados de uma boa e uma má calcinação (Lima, 2016).

Figura 8 – Calcinação da cal.



Fonte: Paiva *et al.* (2007).

Procedimentos analíticos para quantificar óxidos

Lima (2016) descreve dois procedimentos para avaliação qualitativa da cal que serve para quantificar óxido de cálcio e óxido de magnésio. Sendo eles: dissolução com ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA), que é um composto orgânico e funciona como agente quelante para formar complexos muito estáveis com diversos íons metálicos; análise química com utilização de aparelho portátil de fluorescência de Raios-X, que irá emitir energia na forma de Raios-X, e o nível de energia e sua abundância irão depender de quais e quantos átomos estão presentes na amostra, ou seja, irão depender da sua composição química. Pois assim é possível mensurar a quantidade e a qualidade do CaO e o MgO presente, como também avaliar a quantidade de resíduo, a perda ao fogo e umidade.

Segundo a ABNT (2003), o teste qualitativo para magnésio consiste em adicionar amônia para formar fosfato de magnésio e amônio, visando obter um precipitado branco. O precipitado é calcinado transformando o fosfato de magnésio e amônio em pirofosfato de magnésio, e calcula-se as massas para obter o resultado.

Reagentes

Coletores

Os coletores (ionizantes ou não ionizantes) são reagentes de flotação, responsáveis por tornarem determinados minerais repelentes à água por adsorção de moléculas (cobrindo a sua superfície com uma fina película) ou íons na superfície mineral, promovendo a hidrofobização seletiva, que permite as partículas minerais se ligarem às bolhas de ar para serem removidas da polpa durante o processo de flotação (Wills; Napier-Munn, 2006).

Ácido Oleico

Segundo Lipper (2012), o ácido oleico ($C_{18}H_{34}O_2$) é uma substância ativa da intitulada oleína fluida, que serve como coletor aniônico. Seu nome químico é ácido cis 9-octadecenóico, coloração amarelo claro e odor rançoso, é miscível com álcool, clorofórmio, éter, benzeno e com óleos fixos e voláteis. A transformação do ácido oleico em oleato de sódio deve ser feita preferencialmente com soda cáustico (NaOH) a 50% para melhor performance de saponificação do ácido.

Depressores

“Os reagentes usados como depressores na flotação são reagentes capazes de proporcionar um caráter hidrofílico acentuado a determinadas superfícies minerais e de inibir a ação de coletores sobre essas superfícies.” (Nunes; Peres, 2011, pág. 13).

Alginato de sódio

O alginato de sódio ($C_6H_7NaO_6$)_n é um tipo de polissacarídeo natural, quando dissolvido em solução aquosa torna-se um coloide hidrofílico. Utilizado como espessante alimentar, emulsificante, estabilizante e agente de liberação controlada de fármacos, em razão das suas propriedades estáveis, sensibilidade única ao pH e biocompatibilidade (Pawar e Edgar, 2012, *apud* Chen *et al.*, 2017). Possui grupos quelantes (hidroxila e carboxila) em suas moléculas e tem potencial para quelar minerais de cálcio, tornando sua superfície hidrofílica em solução. Por isso, foi incluído como modificante na flotação para separar seletivamente a scheelita, calcita e fluorita. Mostrou-se que o alginato de sódio deprime seletivamente a calcita e fluorita na faixa de pH 7-12, quando se adicionou antes o oleato de sódio como coletor.

Depressores polissacarídeos apresentam várias vantagens em relação aos reagentes inorgânicos por serem mais estáveis, mais viáveis economicamente, biodegradáveis e não-tóxicos (Liu *et al.*, 2000).

Souza *et al.* (2014) citaram que os procedimentos descritos por Hanna e Somasundaran (1976) para obter seletividade na separação entre minerais pouco solúveis, bem como na separação de apatita ou carbonatos (calcita e/ou dolomita), o uso de depressores é essencial.

Conforme Wang *et al.* (2021), o alginato de sódio tem sido amplamente explorado em estudos que promovem a separação por flotação de vários tipos de minerais. Confirmando o efeito de depressão seletiva semelhante na separação de apatita e dolomita devido a diferença de capacidade de adsorção, em que o alginato se adsorve na dolomita por meio de quelação química.

Tanino (pinhão de *Araucária angustifolia*)

Sampaio *et al.* (2022) realizaram uma análise fitoquímica na casca externa do pinhão (semente de *Araucária angustifolia*), ou seja, o tegumento do pinhão, sendo este material composto por três camadas de tecido: camada interna (endotesta), camada intermediária (mesotesta) e camada externa (exotesta). Foi utilizado o extrato hidrofílico (metanol) obtido de cada camada no ciclo de extração. Seções transversais e longitudinais das camadas externa e

intermediária foram usadas para microscopia de luz e epifluorescência. Em todas as camadas foi possível encontrar taninos condensados, flavonóides e triterpenóides.

Os taninos (ou polifenóis), de alto peso molecular, são extraídos de árvores nativas de diferentes regiões. Na tecnologia mineral, os taninos mais utilizados são do quebracho, casca de acácia e lignina. Servem como depressores de calcita, dolomita e siderita na flotação de fluorita com ácidos graxos e na flotação de galena como depressores de esfarelita e ganga carbonatada (Pearse, 2005; Leja, 1982).

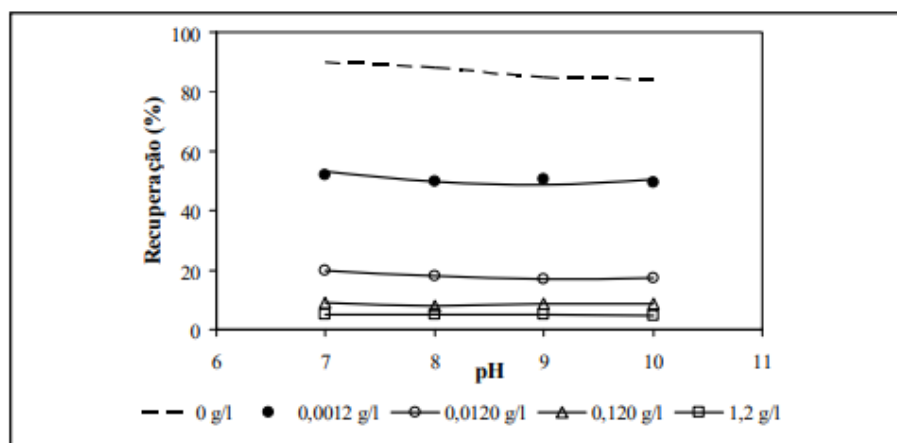
Segundo Castrillon *et al.* (2023), o efluente da casca do pinhão pode ser usado como alternativa para promover a adsorção de íons metálicos na indústria metalúrgica. Devido à presença de taninos, compostos que são os principais responsáveis pela adsorção de íons metálicos. O teor de tanino é responsável pela cor da casca do pinhão. Assim como a casca, as brácteas contêm altos níveis de compostos fenólicos (taninos condensados).

Koester *et al.* (2021) demonstrou que a casca de pinhão cru e cozido tem boas concentrações de compostos fenólicos, como também a semente. A casca e a película que reveste o grão apresentam alto teor de taninos, que quando passam por um processo de cocção migram para a semente resultando na cor amarronzada (Cunha *et al.*, 2018).

Castro e Hoces (1993) realizaram ensaios de flotação de calcita e celestita em bancada, avaliaram a influência do quebracho (tanino) e silicato de sódio como agentes depressores, em diferentes valores de pH e para várias concentrações de coletor. O quebracho foi mais eficiente na depressão da calcita do que na da celestita.

Com o uso de 600 g/t de oleato de sódio, a recuperação de calcita no flotado foi cerca de 90% na ausência de quebracho, e caiu para cerca de 5% na presença de 1,2g/l de depressor, como pode ser observado na Figura 9 o efeito depressor do quebracho (tanino) para calcita (Nunes e Peres, 2011).

Figura 9 – Flotação de calcita com oleato de sódio em função do pH para várias concentrações do quebracho.



Fonte: Castro e Hoces, 1993, *apud* Nunes e Peres (2011).

Hanna e Somasundaran (1976) atribuíram a ação depressora do quebracho à elevada hidrofilicidade dos grupos fenólicos presentes em sua estrutura. Segundo os autores, a adsorção do tanino na calcita ocorre principalmente pela formação de complexos fenolato de cálcio, além de interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio.

Mecanismos da flotação e microflotação

Flotação é um processo de separação, aplicado em diversos setores industriais, principalmente na concentração de minerais para separar seletivamente partículas sólidas de minério da ganga, realizada pela suspensão das partículas em água (polpa). As partículas que se deseja flotar tomam um rumo ascendente pela capacidade de se aderirem (ou aderirem a si) a bolhas de gás (geralmente ar). O conjunto partícula-bolhas torna-se menos densa que o fluido, e o conjunto se desloca verticalmente para a superfície, onde fica retido e é separado numa espuma, enquanto as partículas das demais espécies minerais se mantêm na polpa sem alterar a sua rota (Chaves *et al.*, 2010).

No início da aplicação do processo de flotação, poucos pesquisadores estudaram o comportamento de espécies minerais na presença de reagentes diversos num sistema unitário. Bem como, utilizou-se óleo como fase apolar, e, a aplicabilidade do ar (aeração) se tornou viável quando se compreendeu que a superfície dos minerais podia ter seu grau de hidrofobicidade controlado pela adição de reagentes (Araujo *et al.*, 2005).

As espécies minerais que capturam bolhas de ar no interior da polpa são nomeadas hidrofóbicas, propriedade de tendência dessa espécie mineral ter maior afinidade pela fase gasosa que pela fase líquida. Quanto maior a hidrofobicidade de um mineral, maior será sua

repelência por água e maior sua afinidade por substâncias apolares ou lipofílicas, como o ar atmosférico e substâncias graxas (compostos orgânicos insolúveis em água). Mas, poucos são os minerais naturalmente hidrofóbicos (Leja, 1982).

De acordo com Chaves *et al.* (2010), as espécies minerais com tendência em maior afinidade pela fase líquida que pela fase gasosa são denominadas hidrofílicas, ou seja, quanto maior sua propriedade de hidrofiliidade, maior será a molhabilidade de sua superfície pela água ou por outros líquidos apolares.

Ainda segundo os autores, de certo o comportamento hidrofílico das espécies minerais pode ser bastante alterado pela introdução de substâncias adequadas no sistema de flotação. Além disso, a experiência mostra que, estando presentes duas espécies minerais em um sistema de flotação, é possível induzir a hidrofobicidade em apenas uma delas, mantendo a outra hidrofílica, ou seja, provocar uma hidrofobicidade seletiva.

Dentre os tipos, a flotação direta é quando os minerais de interesse são flotados e separados nas espumas. Contudo, na flotação reversa os minerais de ganga são flotados.

Segundo Araujo *et al.* (2005), conforme evoluiu o processo de flotação intensificou a importância de estudos dos sistemas mineral-reagentes. O que se torna inviável realizar os estudos em escala industrial ou em bancada, frente ao grande número de reagentes alternativos aplicáveis em diversas atribuições na flotação.

De acordo com Luz (1996), a microflotação é propícia para reprodução de ensaios com pouca matéria e bem controlados, os quais permitem a análise de mecanismos de interação entre os reagentes e as superfícies minerais e o levantamento das melhores condições físico-químicas da suspensão ou polpa, como concentração de coletores e/ou depressores, pH etc.

Ainda segundo o autor, os mecanismos que levam à sinérese numa célula de flotação, ou seja, a separação entre as fases componentes da espuma (polpa e ar) são basicamente a drenagem por sucção capilar (fluxo de Plateau) e drenagem por sedimentação gravitacional.

Segundo Santos (2024), a necessidade de experimentar um reagente na usina, por condições de custo-benefício, por exemplo, são necessários os estudos preliminares, como ensaios de microflotação, seguido do estudo em escala de bancada empregando células ou colunas de flotação, para posteriormente realizar-se os testes em escalas piloto e industrial.

Conforme Chudacek *et al.* (1992), para que ensaios de microflotação sejam representativos, o método empregado deve reproduzir, de forma semelhante ao processo

industrial, as condições físicas, químicas e hidrodinâmicas responsáveis pela colisão e adesão partícula–bolha. Entretanto, a semelhança hidrodinâmica nem sempre é devidamente considerada. Segundo os autores, essa representatividade exige a avaliação dos mecanismos de contato partícula–bolha presentes na flotação industrial.

Nesse contexto, os equipamentos de flotação são classificados em dois grupos:

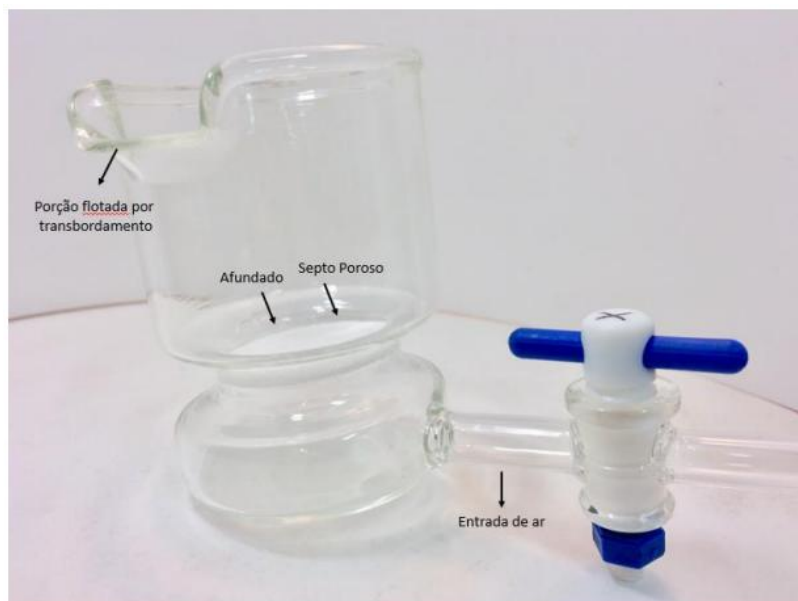
- i. aqueles em que o contato ocorre predominantemente por colisões de alta aceleração e desaceleração (High Acceleration/Deceleration Collision – HAC), como células mecânicas rotor/estator, células pneumáticas de fluxo cruzado e air-sparged hydrocyclones;
- ii. aqueles em que o contato ocorre principalmente por colisões suaves de bolhas em regime gravitacional (Cruising Bubble Collisions – CBC), típicas de células pneumáticas de baixa agitação, flotação a vácuo e colunas.

Este estudo de microflotação foi conduzido em célula de Fuerstenau, equipamento amplamente reconhecido pela elevada precisão e reprodutibilidade em ensaios de flotação em escala laboratorial. Sua concepção permite controle rigoroso das variáveis operacionais, favorecendo a avaliação seletiva das interações entre minerais e reagentes.

Célula de Fuerstenau

Equipamento de laboratório (célula de vidro de 125 ml introduzida em 1963, por Maurice C. Fuerstenau), para testes de bancadas, com o objetivo em pequena escala, que simula condições controladas para avaliação inicial de componentes ou processos (Fuerstenau, 1999). Desenvolvido para produzir e otimizar processos de flotação com boa reprodutibilidade, mas com particularidades como o arraste hidrodinâmico, que precisa ser controlado em relação à granulometria. Possui um septo poroso de vidro sinterizado na parte inferior do dispositivo para distribuição do gás na polpa mineral. O agitador mecânico é que produz a agitação. A célula permite um bom controle das variáveis operacionais, mostra boa repetibilidade, sendo utilizada atualmente em pesquisas de caráter fundamental (Araujo *et al.*, 2005), conforme Figura 10.

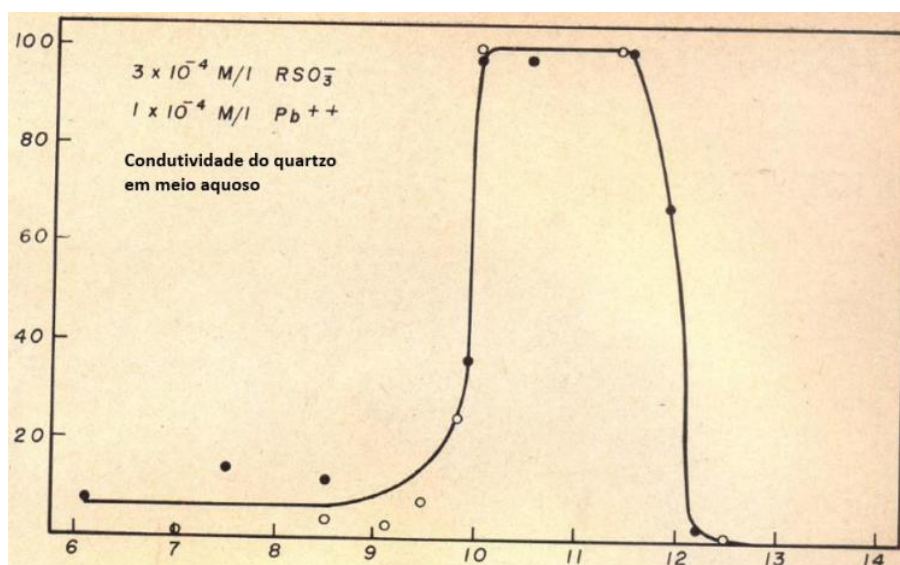
Figura 10 – Célula de Fuerstenau.



Fonte: Silva (2018).

Fuerstenau (1964) realizou ensaios que apresentaram boa reprodutibilidade, como observado na Figura 11. Allison e colaboradores, do National Institute for Metallurgy — Randburg (Allison e Finkelstein, 1974, *apud* Ruijter, 1979) consideraram a reprodutibilidade da célula razoavelmente boa. Eles obtiveram desvios padrão amostrais de 1,8 % para recuperações entre 90 e 100 % e de 11,5 % para recuperações entre 20 e 30 %. Os desvios padrão amostrais das demais recuperações ficaram entre 4,2 e 9,8 %.

Figura 11 – Ensaios na célula de Fuerstenau.



Fonte: Traduzido de Fuerstenau, 1964, *apud* Silva (2018).

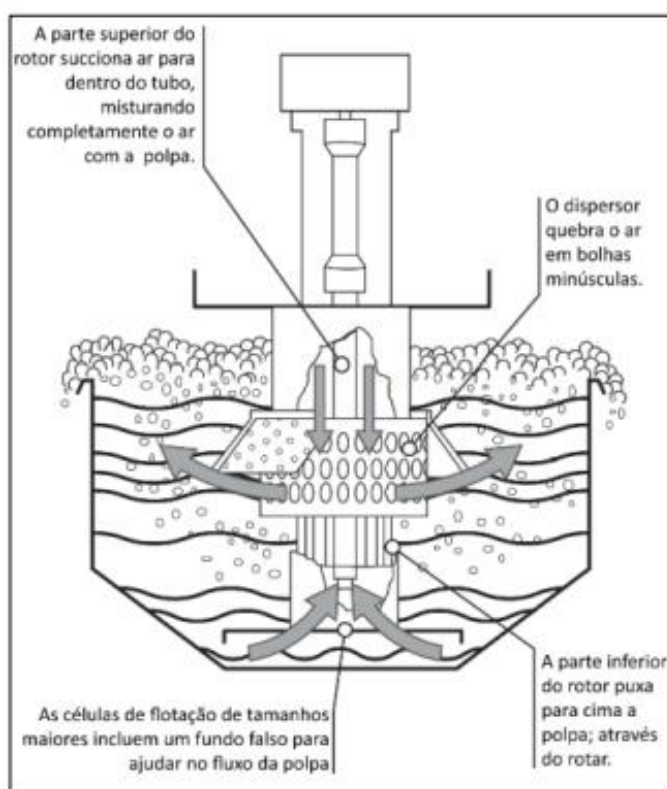
Conforme Luz (1996), a célula de Fuerstenau revelou-se como uma técnica competente para ensaios prospectivos, resultando em uma boa correlação entre os resultados de microflotação e células de bancada. Assegurando, que os valores de flotabilidade na microflotação devem ser entendidos como qualitativos ou, no máximo, semiquantitativos.

Máquinas e circuito de flotação industrial

No começo, completado 100 anos em 2005, havia pouca base científica e a necessidade de entender os princípios fundamentais ocorreu a partir da primeira década que sucedeu à introdução industrial do processo (Araujo *et al.*, 2005).

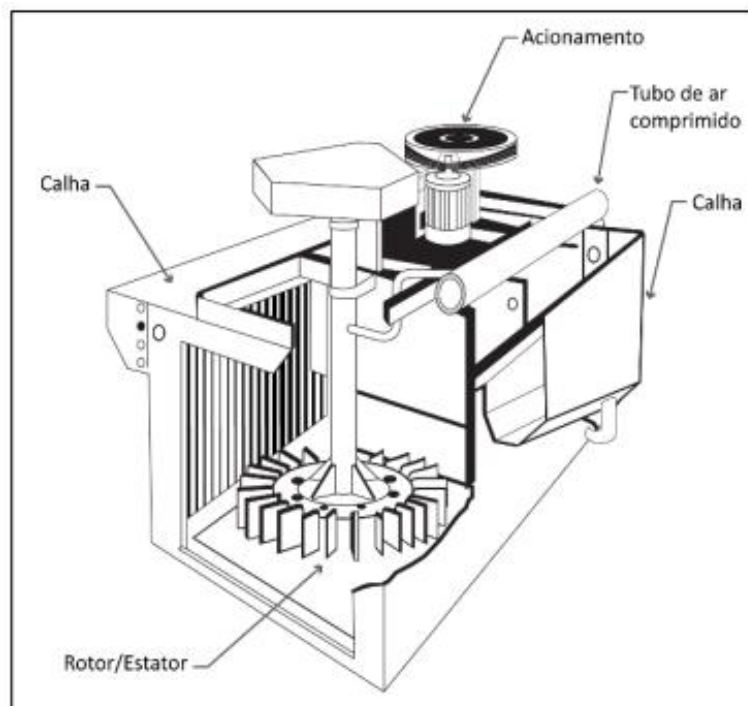
Refere-se a tanques projetados para receber a polpa mineral alimentada, continuamente, de um lado, e do outro lado descarrega, conforme modelos (Figuras 12 e 13).

Figura 12 – Máquina de flotação (modelo Wemco).



Fonte: Chaves *et al.* (2010).

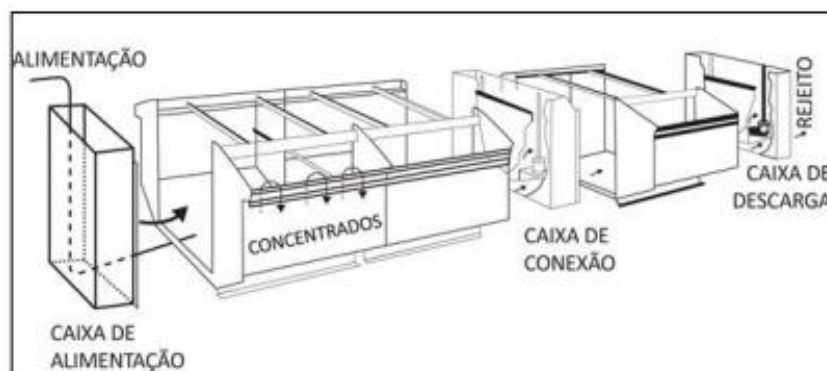
Figura 13 – Máquina de flotação (modelo Galigher).



Fonte: Chaves *et al.* (2010).

A máquina de flotação é instalada dentro da célula de flotação (Figura 14) e integra-se um rotor, no fundo da célula, suspenso por um eixo conectado a um acionamento (fora da célula e acima), girando dentro de um tubo e/ou estator. O rotor tem o princípio de manter a polpa agitada e em suspensão.

Figura 14 – Arranjo de células de flotação.

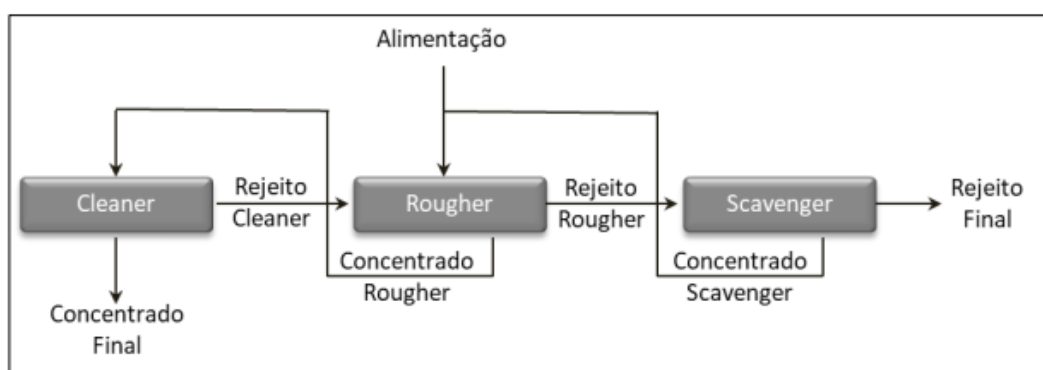


Fonte: Chaves *et al.* (2010).

Na flotação, assim como em outras operações de concentração, é difícil atingir simultaneamente altos teores e elevadas recuperações em uma única etapa. Por isso, o processo é normalmente dividido em estágios (Figuras 15 e 16). Na etapa *rougher* obtém-se um

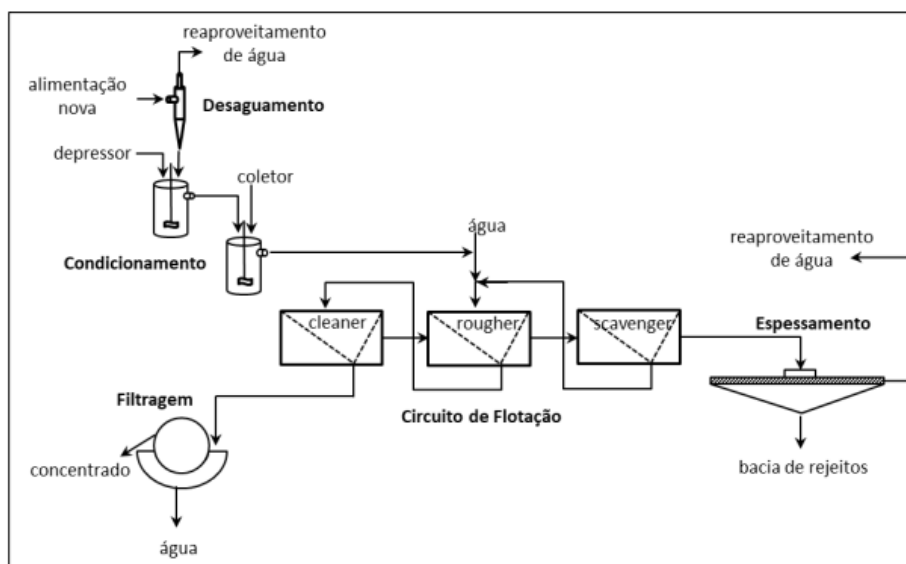
concentrado de baixo teor e um rejeito ainda contendo minerais úteis. O concentrado *rougher* é submetido à etapa *cleaner*, na qual se produz o concentrado final e um rejeito com teor relativamente elevado. Já o rejeito *rougher* é tratado na etapa *scavenger*, gerando um rejeito final de baixo teor e um concentrado intermediário. Tanto o rejeito *cleaner* quanto o concentrado *scavenger* são recirculados para a etapa *rougher*, visando maximizar a recuperação global do processo (Chaves *et al.*, 2010).

Figura 15 – Circuito de flotação.



Fonte: Chaves *et al.* (2010).

Figura 16 – Esquema de um circuito completo de flotação.



Fonte: Chaves *et al.* (2010).

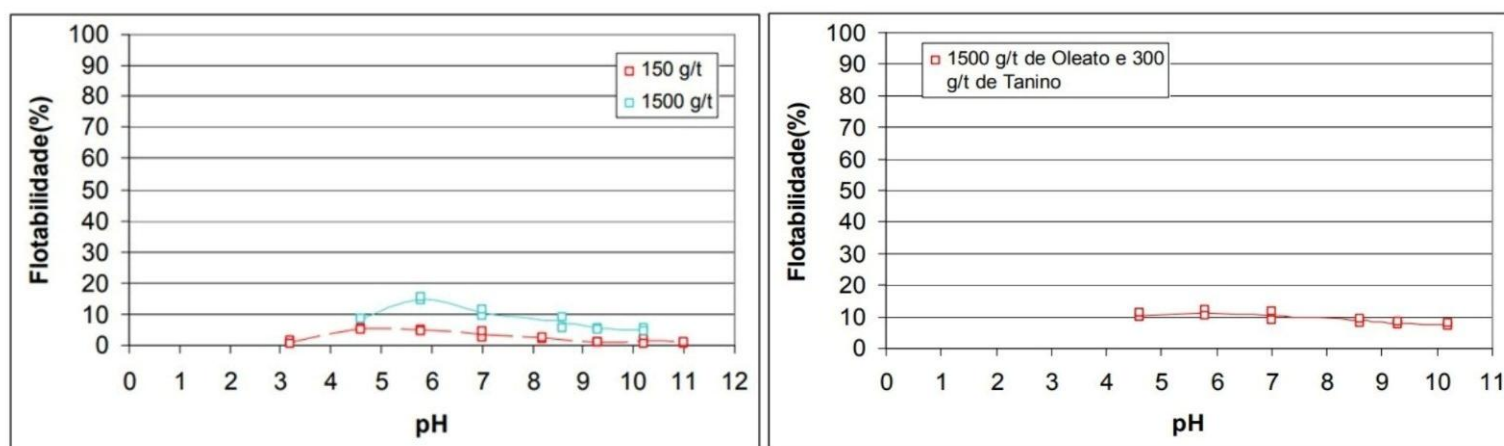
Flotabilidade de carbonatos e quartzo

Costa (2009) realizou ensaios de microflotação em célula de Fuerstenau para determinar as melhores condições de flotação seletiva na separação entre minerais de hematita, quartzo e

dolomita. Neste estudo, destaca-se o uso do oleato de sódio como coletor e o uso do tanino como depressor para os minerais em foco (Figuras 17 e 18).

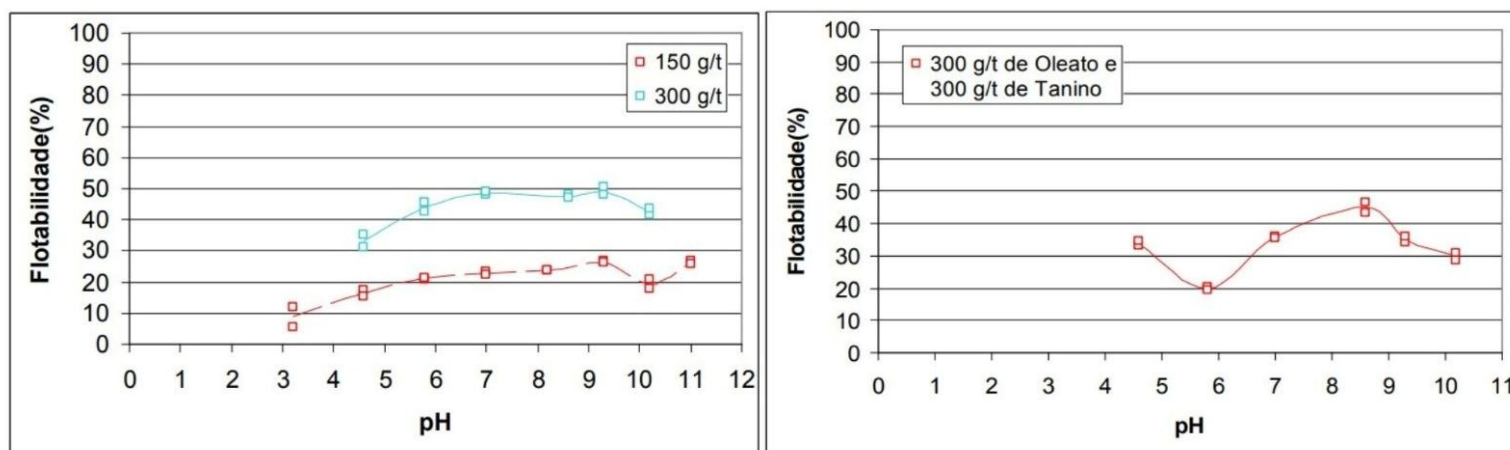
O coletor foi obtido por saponificação, gerando concentração de dosagem de 1%. Os ensaios (apenas coletor) foram realizados em diferentes dosagens.

Figura 17 – Flotabilidade do quartzo por oleato (à esquerda) e por tanino e oleato em função do pH.



Fonte: Adaptado de Costa (2009).

Figura 18 – Flotabilidade da dolomita por oleato (à esquerda) e por tanino e oleato em função do pH.



Fonte: Adaptado de Costa (2009).

Conforme Santos (2024), ao realizar os ensaios de microflotação no Tubo de Hallimond (célula de flotação) com ácidos graxos (oleato e palmitato de sódio) puros e em mistura como coletores, objetivando maximizar a flotabilidade da apatita e minimizar a flotabilidade da calcita e dolomita, determinou-se que entre os três minerais estudados, a calcita apresentou maior arraste hidrodinâmico (fenômeno indesejado), com valor de 4,56%, seguido da apatita, 3,05% e dolomita 2,51%. Apesar que, baixo índice de transporte hidrodinâmico, ocasiona baixo

carreamento de partículas pelo fluxo ascendente gerado pelas bolhas de gás nitrogênio. O autor ainda cita que, a calcita se torna mais insolúvel em pH alcalino (ou básico), com maior avanço para valores de pH menores que 9,0. A dolomita apresenta comportamento semelhante à calcita, pela natureza de sua composição (Ofori *et al.*, 1985).

Neste estudo, é apresentado os dados de flotabilidade (Tabela 2), com foco para o oleato de sódio como coletor para os minerais em foco.

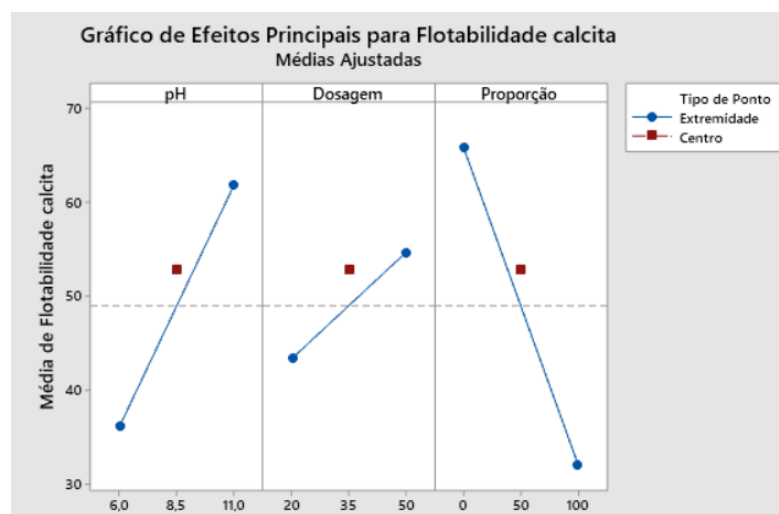
Tabela 2 – Resultado de flotabilidade com planejamento fatorial com ponto central em quintuplicata.

pH	Dosagem (mg/L)	Proporção (%)	Flotabilidade Calcita (%)	Flotabilidade Dolomita (%)
6,0	20	Oleato de Sódio	51,74	14,77
11,0	20	Oleato de Sódio	74,13	90,55
6,0	50	Oleato de Sódio	73,45	40,91
11,0	50	Oleato de Sódio	64,33	95,96
8,5	35	50% palmitato e 50% oleato	48,88	95,28
8,5	35	50% palmitato e 50% oleato	54,16	93,89
8,5	35	50% palmitato e 50% oleato	62,44	95,63
8,5	35	50% palmitato e 50% oleato	48,42	96,08
8,5	35	50% palmitato e 50% oleato	50,65	96,00

Fonte: Adaptado de Santos (2024).

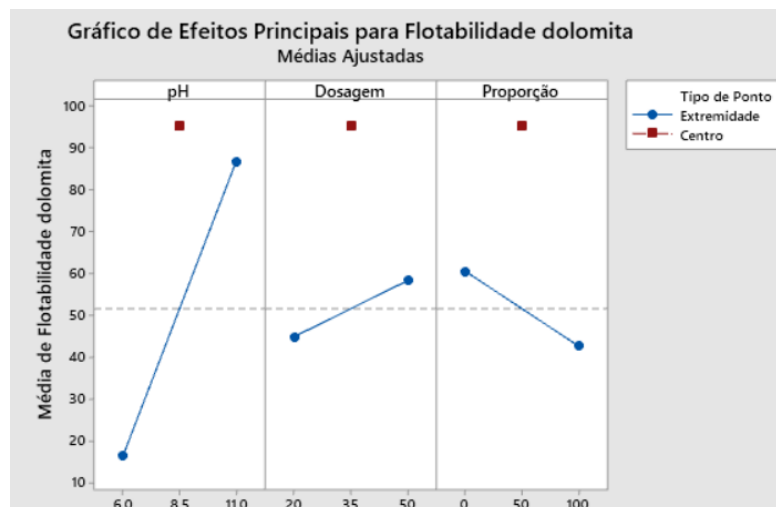
O oleato de sódio em pH 11 (alcalino) e em maior dosagem, mostrou ser mais seletivo para a dolomita (acima de 90%), esse resultado pode ser atribuído a solubilidade dos minerais, uma vez que a calcita é o mineral mais solúvel. Melhor demonstrado os resultados, conforme Figuras 19 e 20, a seguir.

Figura 19 – Efeitos principais para flotabilidade da calcita. (considerações: na proporção 0 significa 100% oleato e o 100 indica 100% palmitato).



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Figura 20 – Efeitos principais para flotabilidade da dolomita. (considerações: na proporção 0 significa 100% oleato e o 100 indica 100% palmitato).

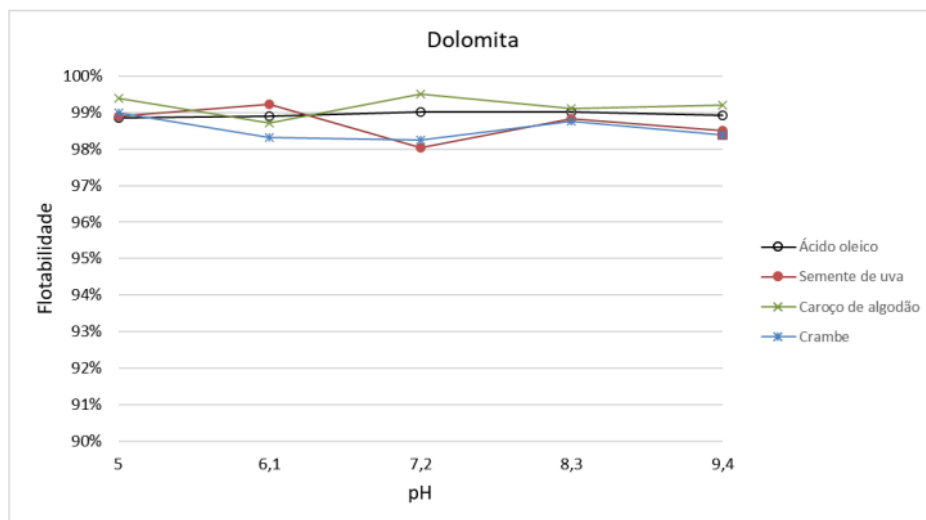


Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Gomes (2022) realizou ensaios de microflotação com hematita e dolomita na célula de Fuerstenau em três etapas principais, objetivando avaliar o potencial de sabões de óleos, como os de semente de uva, de caroço de algodão e de crambe como coletores na flotação de minérios dolomíticos, usando o oleato de sódio como referência. A primeira e a segunda etapa foram realizadas apenas com coletor, sistema isolado e concentração de 50 mg/L e mistura sintética igualitária dos minerais, com concentração de 20 mg/L, respectivamente. A terceira etapa, sistema binário, com adição de depressor (amido de mandioca) com concentração de 3 mg/L e coletor com 50 mg/L.

No sistema simplificado com 50 mg/L de coletor, todos os óleos apresentaram alta flotabilidade para a dolomita, conforme Figura 21. Para a dolomita em solução, as concentrações das espécies Mg^{2+} e Ca^{2+} predominam no pH 6, o que favorece a adsorção do coletor em sua superfície aumentando a flotabilidade do mineral (Chen; Tao, 2004).

Figura 21 – Flotabilidade da dolomita em relação ao pH.



Fonte: Adaptado de Gomes (2022).

De acordo com Tohry *et al.* (2021), ao realizar ensaios microflotação de hematita e quartzo, os resultados indicaram que o tanino deprime seletivamente mais de 90% da hematita, enquanto seu efeito na flotabilidade do quartzo foi desprezível, uma depressão menor que 8%.

Os taninos são um tipo de polifenóis que têm sido considerados relevantes para a separação por flotação de calcita e pirita (Rutledge, 2016, *apud* Tohry *et al.*, 2021).

METODOLOGIA

Nesta seção são descritos os materiais, equipamentos e os procedimentos metodológicos empregados em todas as etapas da campanha experimental desenvolvida neste trabalho. A metodologia foi estruturada de forma sequencial, contemplando a preparação, homogeneização e o quartejamento das amostras, a caracterização físico-química e mineralógica, bem como a realização dos ensaios de microflotação.

A preparação das amostras de quartzo e calcário envolveu etapas de cominuição, peneiramento em faixa granulométrica adequada aos ensaios de microflotação, homogeneização e quartejamento, visando garantir a representatividade e reprodutibilidade dos resultados. A caracterização das amostras de calcário foi conduzida por meio de ensaios de picnometria, calcinação, análise termogravimétrica (ATG) e difratometria de raios X (DRX), permitindo a avaliação das propriedades físicas, mineralógicas e análises térmicas do material estudado.

Os ensaios de microflotação foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento dos minerais frente aos reagentes utilizados, visando analisar a seletividade do processo na separação entre calcário e quartzo. Nessa etapa, foram preparados e dosados o coletor (oleato de sódio), os agentes depressores (alginato e efluente de pinhão – *Araucária angustifolia*), bem como os reguladores de pH e o espumante, com controle das condições operacionais, incluindo vazão de ar e tempo de condicionamento e flotação.

A preparação das amostras foi realizada no laboratório de Tratamento de Minérios, e os ensaios de flotação e os demais procedimentos experimentais foram conduzidos nos laboratórios de Reologia e Caracterização Tecnológica, todos vinculados ao Departamento de Engenharia de Minas (Demin) da Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop).

Preparação das amostras

A amostra de quartzo foi cedida pelo laboratório de Tratamento de Minérios do Demin, e as amostras de calcário (Figura 22) foram cedidas pelo professor Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.

Figura 22 – Amostras utilizadas neste estudo.



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, as amostras foram submetidas aos processos de fragmentação e cominuição. Para isso, utilizou-se um britador de mandíbulas, seguido por um britador de rolos, e posteriormente um moinho de bolas, no qual os materiais foram moídos por 30 minutos. Após a moagem, realizou-se o peneiramento a seco (com peneiras de alívio) por 10 minutos, adotando como fração de interesse o material passante em 0,208 mm (65#) e o retido em 0,074 mm (200#). Foram preparados 641,56 g de quartzo e 797,46 g de dolomito, totalizando 1439,02 g para os ensaios. O moinho, os corpos moedores de porcelana e o peneirador encontram-se nas Figuras 23, 24 e 25, respectivamente.

Figura 23 – Moinho.



Fonte: Autor (2025).

Figura 24 – Corpos moedores de porcelana.



Fonte: Autor (2025).

Figura 25 – Peneirador.



Fonte: Autor (2025).

Na sequência, as amostras foram submetidas a homogeneização e quarteramento por pilha cônica, de forma a garantir a representatividade considerou-se 5% de variação entre as massas.

Preparação dos reagentes

A determinação da dosagem de reagentes foi realizada a partir da relação fundamental de concentração desejada em solução, expressa pela Equação 1. A partir da massa de reagente calculada, a dosagem foi posteriormente convertida para consumo específico em função das massas das amostras utilizadas nos ensaios, conforme a Equação 2. Sendo o resultado expresso em termos de gramas por tonelada de minério.

$$C = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

C : concentração desejada [g/L].

m : massa do reagente [g];

V : volume útil da célula de flotação [L].

$$C = \frac{m_{reagente}}{m_{minério}} \quad (2)$$

Onde:

C : concentração [g/t];

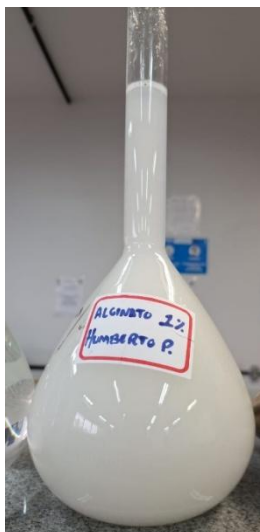
$m_{minério}$: para este estudo 30×10^{-6} t [30 g].

Foram preparados os reagentes. O ácido oleico foi saponificado (transformado em oleato de sódio) para atuar como coletor, em concentração de 1% (10 gramas em 1000 mL). O procedimento de preparação do ácido em sal orgânico está descrito a seguir.

- i. Inicialmente, utilizou-se um béquer de 250 mL, no qual foi adicionada água destilada em volume suficiente para permitir a dissolução e homogeneização dos reagentes, com aquecimento controlado até 60° C;
- ii. Em seguida, adicionou-se, de forma gradual e sob agitação, uma solução aquosa de NaOH a 3%, preparada na proporção de 3 g de NaOH em 100 mL de água destilada, até que a solução atingisse pH igual a 12, condição necessária para favorecer a reação de saponificação;
- iii. Posteriormente, foram adicionados 10 g de ácido oleico à solução alcalina, mantendo-se a agitação para promover a dispersão do reagente orgânico no meio aquoso;
- iv. A mistura resultante foi então transferida quantitativamente para um balão volumétrico de 1000 mL, procedendo-se à adição de água destilada até próximo da marca de aferição (menisco), com aquecimento controlado até 60° C;
- v. Após a diluição inicial, o pH da solução foi novamente verificado e ajustado, quando necessário, até pH igual a 6, por meio da adição controlada de solução ácida ou básica;
- vi. Em seguida, o volume do balão foi completado com água destilada até a marca de aferição, realizando-se nova conferência do pH, assegurando sua estabilização em pH 6;
- vii. Por fim, a solução foi submetida à agitação em agitador magnético, mantendo-se essa condição até a completa saponificação do ácido oleico e a obtenção do oleato de sódio em solução homogênea.

O alginato por sua vez, foi utilizado como depressor na mesma concentração de 1% (10 g/L), foi diluído em água destilada, conforme Figura 26, adicionou-se em minúsculas frações à temperatura ambiente e em agitação constante com o uso do agitador magnético para evitar formação de grumos.

Figura 26 – Alginato diluído em água destilada à concentração de 1%.



Fonte: Autor (2025).

Adicionalmente, testou-se o uso do efluente de pinhão de *Araucária angustifolia* como depressor alternativo. O efluente resultante do cozimento do pinhão é conhecido por apresentar teores significativos de compostos fenólicos solúveis, incluindo taninos, provenientes da casca e do tegumento da semente, que migram para a água de cozimento durante o processo térmico. Estudos fitoquímicos demonstram e confirmam que os resíduos da semente e seus extratos, após o cozimento, contêm taninos condensados, flavonoides e outros fenólicos (Sampaio *et al.*, 2022).

No procedimento experimental adotado, o efluente de pinhão foi acondicionado em béquer e levado à estufa térmica a 120° C até a completa evaporação do líquido, resultando em um extrato sólido residual, conforme Figura 27, por meio da diferença entre as massas (inicial e final) obteve-se a relação para sequenciamento dos cálculos de concentração de compostos. Segundo Koester *et al.* (2021), esse material, aqui denominado extrato sólido concentrado de pinhão, representa uma matriz complexa de compostos orgânicos hidrossolúveis extraídos da semente, sendo enriquecido de taninos, mas não se configura como tanino isolado de forma pura. Neste trabalho, não se determinou a concentração dos taninos no extrato sólido residual.

Figura 27 – Extrato sólido concentrado de pinhão.



Fonte: Autor (2025).

Para o ajuste do pH nos ensaios de microflotação, foram utilizadas soluções de caráter ácido e básico, empregando-se ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH), na concentração, respectivamente, 5% e 2%. Como agente espumante, utilizou-se óleo de pinho na concentração de 3%, sendo adicionadas 12 gotas de espumante em cada ensaio.

Caracterização das amostras

Picnometria

A verificação da pureza e a caracterização física dos minerais estudados foram realizadas por meio da determinação da massa específica real das amostras, utilizando o método de picnometria. O teste foi conduzido em triplicata para o quartzo e dolomito, visando maior confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados. Em substituição à água destilada, empregou-se álcool etílico 70% como fluido de referência, uma vez que, nos testes preliminares com água, observou-se a formação significativa de bolhas e espuma, especialmente associadas à presença de ar aprisionado entre os grãos minerais, o que poderia comprometer a precisão das medições.

Foram utilizados picnômetros de vidro com volume nominal de 50 mL, de modo a ocupar cerca de um terço do volume total do dispositivo, condição considerada adequada para minimizar erros experimentais e facilitar a completa infiltração do fluido entre as partículas sólidas.

O procedimento experimental seguiu as seguintes etapas, conforme sugerida por Milhomem e da Luz (2016).

- a) determinação da massa do picnômetro seco, limpo e com tampa, obtendo-se a massa (m_p);
- b) adição da amostra mineral ao picnômetro até aproximadamente um terço de seu volume, seguida da pesagem do conjunto picnômetro + amostra, resultando na massa (m_{pm});
- c) adição do álcool 70% ao picnômetro até o completo recobrimento da amostra, aplicando-se vibração com o uso da mesa vibratória no dispositivo para facilitar a liberação de bolhas de ar e promover a completa penetração do fluido entre os grãos; em seguida, completou-se o volume até a marca de referência com auxílio de seringa, procedendo-se à pesagem do conjunto picnômetro + amostra + álcool, com a parte externa devidamente seca, obtendo-se a massa (m_{pma});
- d) determinação da massa do picnômetro preenchido apenas com álcool 70% até a superfície da tampa, com o dispositivo seco externamente, obtendo-se a massa (m_{pa}).

A massa específica foi calculada pela Equação 3.

$$\rho = \frac{(m_{pm} + m_p) \times \rho_{\text{álcool}}}{(m_{pa} + m_{pm}) - (m_p + m_{pma})} \quad (3)$$

Onde:

ρ – Massa específica da amostra [kg/m^3];

$\rho_{\text{álcool}}$ - Massa específica do álcool [kg/m^3];

m_p – Massa do picnômetro vazio com a tampa [kg];

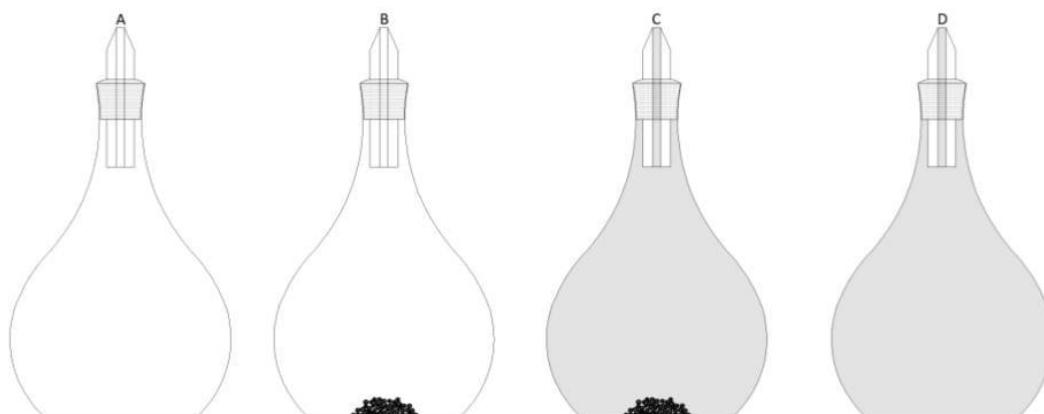
m_{pm} – Massa do picnômetro mais minério [kg];

m_{pma} – Massa do picnômetro mais minério mais água [kg];

m_{pa} – Massa do picnômetro mais água [kg].

Ilustração esquemática das etapas do procedimento experimental (Figura 28).

Figura 28 – Ilustração esquemática do método de picnometria para determinação de massa específica.



Fonte: Adaptado de Milhomem e da Luz (2016).

Difratometria de raios X

A amostra de calcário foi submetida à caracterização estrutural e mineralógica por meio de ensaio de difratometria de raios X (DRX), com o objetivo de identificar e avaliar as fases cristalinas presentes no material estudado.

O ensaio de DRX foi conduzido em difratômetro da fabricante PANalytical, modelo X'Pert³ Powder, com tubo de cobre e filtro de níquel, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Difratômetro.



Fonte: Autor (2025).

Calcinação por forno mufla

Amostras representativas de calcário foram inicialmente pesadas para determinação de suas massas iniciais (1,85% ou 15 g da amostra preparada) em três cadinhos de porcelana diferentes, 5 g em cada. Foram colocadas em estufa a 120° C por 1 hora, com o objetivo de remover a umidade residual e possíveis voláteis superficiais. Após essa etapa, as amostras foram novamente pesadas, permitindo a quantificação das perdas de massas associadas à eliminação desses componentes. Posteriormente, as amostras secas foram transferidas para um forno mufla e submetidas ao processo térmico, permanecendo por 6 horas à temperatura de 900° C, visando a transformação dos carbonatos em óxidos com liberação de CO₂. Ao término do tratamento térmico, as amostras calcinadas foram pesadas novamente. As massas iniciais e finais obtidas foram utilizadas para o cálculo da perda de massa por calcinação, possibilitando a avaliação das transformações térmicas ocorridas durante o processo de calcinação.

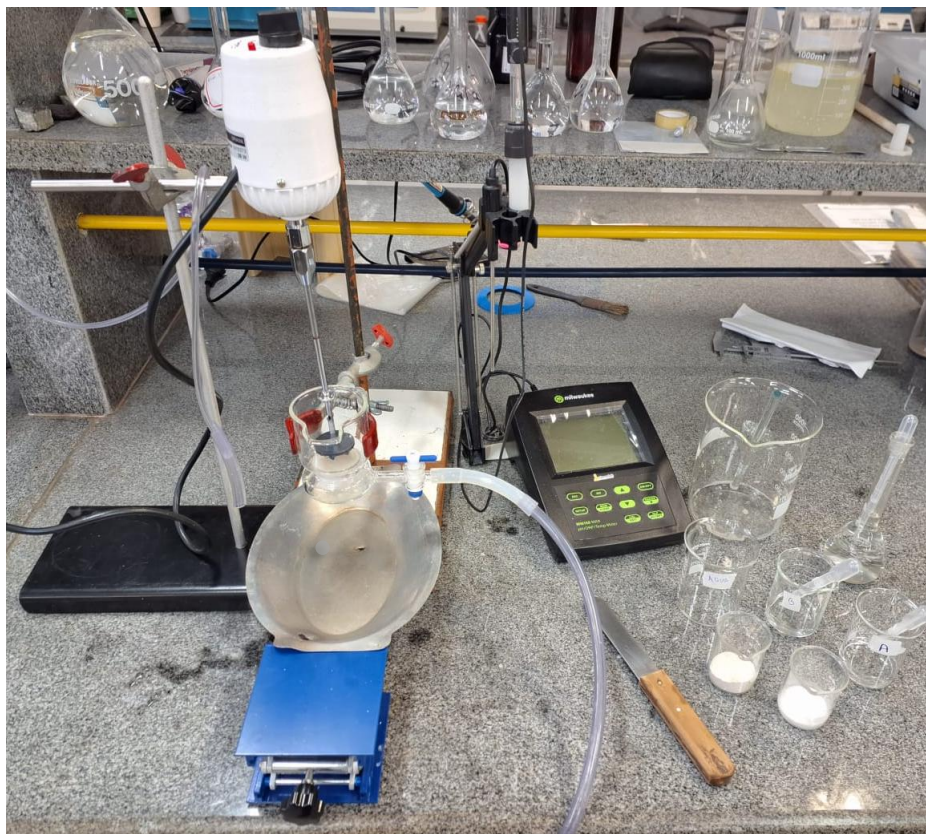
Análise termogravimétrica (ATG)

O ensaio termogravimétrico foi conduzido com o objetivo de avaliar o comportamento térmico e os eventos de perda de massa da amostra de calcário, por meio da técnica de análise termogravimétrica (ATG), a fim de obter-se maior precisão devido ao ambiente de atmosfera controlada. A análise foi realizada em equipamento TGA Q50 (versão de software V20.13, Build 39, número de série 0050-1096), operando em modo dinâmico até a temperatura máxima de 1000° C. A amostra, com massa inicial de 87,38 mg, foi acondicionada em cadinho de platina, material quimicamente inerte e adequado para altas temperaturas. Durante o ensaio, utilizou-se atmosfera controlada de nitrogênio, com vazão total de 100 mL min⁻¹, sendo 10 mL min⁻¹ destinados ao gás de balanço e 90 mL min⁻¹ ao gás de arraste da amostra. O sistema de aquecimento consistiu em uma razão constante de 10° C min⁻¹, desde a temperatura ambiente até 1000° C, seguida de um tempo de resfriamento de 15 minutos.

Ensaio de microflotação

Os testes foram conduzidos em célula de Fuerstenau (volume útil de 110 mL), conforme Figura 30, com vazão de ar de 260 mL/min e água de reposição de 83 mL/min. O tempo de condicionamento foi de 3 minutos para o depressor, seguido de 2 minutos para o coletor. Os ensaios foram realizados em duplicata (exceto para o efluente de pinhão), em diferentes valores de pH, aproximadamente, 6, 7, 8 e 9, utilizando 15 g de cada mineral por ensaio.

Figura 30 – Sistema de microflotação em célula de Fuerstenau.



Fonte: Autor (2025).

De modo geral, os ensaios realizados foram fundamentados na metodologia proposta por Luz (1996), sendo, contudo, introduzidas adaptações nos parâmetros operacionais e pequenas modificações no procedimento experimental, de forma a adequá-lo aos objetivos e às condições específicas deste trabalho.

I – Condições Gerais

- 1) Volume de água destilada de flotação [98 mL];
- 2) Volume de coletor [1,9 mL];
- 3) Volume de depressor [0,55 mL];
- 4) Amostras [30,0 g];
- 5) Água de reposição [2000 mL];
- 6) Velocidade de agitação: Nível 2 [216 rpm];
- 7) Tempo de flotação [4 minutos].

II – Procedimento Experimental

A – Ensaio sem depressor

- i. ajuste do pH da água de flotação e água de reposição;
 - ii. registro do pH inicial;
 - iii. despejo cuidadoso as amostras no fundo seco da célula (massa de 30,0 g);
 - iv. adição de 98 mL da água de flotação; iniciação da agitação e disparo do cronômetro, mantendo-se o sistema até o fim do condicionamento, o qual deve ser de 2 minutos (120 s) (hidratação);
 - v. adição do volume (necessário para a dosagem) a 1%, em massa de coletor; ajuste de pH, e início do segundo condicionamento (por exemplo, para dosagem de coletor igual a 619,34 g/t tem-se, para 30,0g de sólidos, o seguinte volume a 1 %:
- $$Volume = \frac{\left(619,34 \frac{g}{t} \right) \times \left(30 \times 10^{-6} \right)}{0,01} \times \frac{1}{1 \frac{g}{mL}} = 1,86 \text{ mL}$$
- vi. gotejamento de espumante após 110 s do início do condicionamento de 12 gotas de óleo de pinho;
 - vii. injeção de gás, via abertura das válvulas, mantendo-se a vazão constante, durante o tempo de flotação; adição por gotejamento da água de reposição;
 - viii. interrupção do fluxo de gás, término da agitação, verificação e registro do pH final;
 - ix. separação cuidadosa do material flotado e do não-flotado, lavando-se bem as paredes da célula com pisseta;
 - x. filtragem das frações em papel-filtro rotulado e sua secagem a 100°C;
 - xi. pesagem das frações em balança analítica de precisão.

B – Ensaio com depressor (alginato) e coletor

- i. ajuste do pH da água de flotação e água de reposição;
- ii. registro do pH inicial;
- iii. despejo cuidadoso as amostras no fundo seco da célula (massa de 30,0 g);
- iv. adição de 98 mL da água de flotação; iniciação da agitação e disparo do cronômetro, mantendo-se o sistema até o fim do condicionamento, o qual deve ser de 2 minutos (120 s) (hidratação);

- v. adição da solução depressora (necessário para a dosagem) a 1%, em massa; ajuste de pH, e início do segundo condicionamento (por exemplo, para dosagem de depressor igual a 181,67 g/t tem-se, para 30,0g de sólidos, o seguinte volume a 1 %:

Volume =

$$\frac{\left(181,67 \frac{g}{t} \right) \times (30 \times 10^{-6})}{0,01} \times \frac{1}{1 \frac{g}{mL}} = 0,55 \text{ mL}$$

- vi. adição do volume (necessário para a dosagem) a 1%, em massa de coletor; ajuste de pH, e início do terceiro condicionamento (por exemplo, para dosagem de coletor igual a 619,34 g/t tem-se, para 30,0g de sólidos, o seguinte volume a 1 %:

Volume =

$$\frac{\left(619,34 \frac{g}{t} \right) \times (30 \times 10^{-6})}{0,01} \times \frac{1}{1 \frac{g}{mL}} = 1,86 \text{ mL}$$

- vii. gotejamento de espumante após 110 s do início do condicionamento de 12 gotas de óleo de pinho;
- viii. injeção de gás, via abertura das válvulas, mantendo-se a vazão constante, durante o tempo de flotação; adição por gotejamento da água de reposição;
- ix. interrupção do fluxo de gás, término da agitação, verificação e registro do pH final;
- x. separação cuidadosa do material flotado e do não-flotado, lavando-se bem as paredes da célula com pisceta;
- xi. filtragem das frações em papel-filtro rotulado e sua secagem a 100°C;
- xii. pesagem das frações em balança analítica de precisão.

C – Ensaio com depressor (efluente de pinhão) e coletor

- i. ajuste do pH da água de flotação e água de reposição;
- ii. registro do pH inicial;
- iii. despejo cuidadoso das amostras no fundo seco da célula (massa de 30,0 g);
- iv. adição de 89 mL da água de flotação; iniciação da agitação e disparo do cronômetro, mantendo-se o sistema até o fim do condicionamento, o qual deve ser de 2 minutos (120 s) (hidratação);
- v. adição da solução depressora a 10%, em volume útil da célula (11 mL); ajuste de pH, e início do segundo condicionamento;
- vi. adição do volume a 1%, em massa de coletor (1,86 mL); ajuste de pH, e início do terceiro condicionamento;

- vii. gotejamento de espumante após 110 s do início do condicionamento de 12 gotas de óleo de pinho;
- viii. injeção de gás, via abertura das válvulas, mantendo-se a vazão constante, durante o tempo de flotação; adição por gotejamento da água de reposição;
- ix. interrupção do fluxo de gás, término da agitação, verificação e registro do pH final;
- x. separação cuidadosa do material flotado e do não-flotado, lavando-se bem as paredes da célula com pisceta;
- xi. filtragem das frações em papel-filtro rotulado e sua secagem a 100°C;
- xii. pesagem das frações em balança analítica de precisão.

Determinação de parâmetros

A determinação do teor de dolomita e calcita na amostra de calcário foi realizada a partir do resultado de perda de massa, utilizando-se o método de balanço estequiométrico para misturas binárias de carbonatos. O cálculo do teor de dolomita foi efetuado conforme a Equação 4.

$$T_d = \frac{q - f_c}{f_d - f_c} \quad (4)$$

Onde:

T_d : teor mássico de dolomita presente na amostra [%];

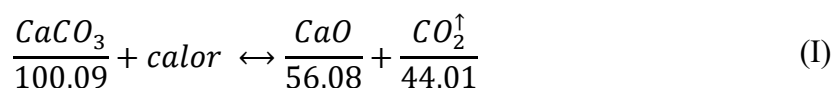
q : fração mássica residual experimental da amostra após a calcinação, obtida pela razão entre a massa final calcinada e a massa inicial;

f_c : fração mássica residual teórica do óxido de cálcio proveniente da calcita após a calcinação;

f_d : fração mássica residual teórica do óxido de cálcio e magnésio proveniente da dolomita após a calcinação;

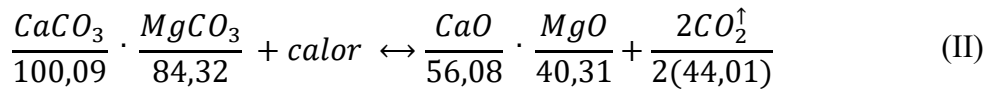
O teor de calcita (T_c) foi obtido conforme a relação $T_c = 1 - T_d$.

A aplicação da Equação (4) fundamenta-se nas Estequiometrias I e II das reações de decomposição térmica da calcita e da dolomita, respectivamente, que apresentam diferentes frações de resíduo sólido após a liberação de dióxido de carbono (Sampaio e Almeida, 2008).



Sendo:

$$f_c = \frac{56,08 \text{ g/mol}}{100,09 \text{ g/mol}} = 0,56$$



Sendo:

$$f_d = \frac{96,39 \text{ g/mol}}{184,41 \text{ g/mol}} = 0,52$$

Essas frações mássicas residuais teóricas foram utilizadas como parâmetros na Equação (4), permitindo estimar de forma indireta e quantitativa os teores de dolomita e calcita presentes na amostra de calcário a partir dos resultados experimentais de calcinação.

A fim de complementar e comparar, foi empregada a relação baseada no ensaio de picnometria, conforme a Equação 5. Esse método fundamenta-se nas diferenças de massas específicas entre os constituintes minerais da amostra, permitindo estimar suas proporções a partir da massa específica aparente medida (Adaptado de Gomes, 2022).

$$T_d = \frac{\rho_{dol} \times (\rho_{am} - \rho_{cal})}{\rho_{am} \times (\rho_{dol} - \rho_{cal})} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{dol} : massa específica teórica da dolomita [g/cm³];

ρ_{cal} : massa específica teórica da calcita [g/cm³];

ρ_{am} : massa específica da amostra determinada experimentalmente por picnometria [g/cm³];

O teor de calcita (T_c) foi obtido conforme a relação $T_c = 1 - T_d$.

Para determinar o teor de calcário na mistura pós ensaio de microflotação, foram levadas as massas (flotada e afundada) para ensaios de picnometria para determinar as massas específicas e em seguida realizou-se o ensaio de perda por calcinação (PPC) no forno mufla por 6 horas, 900° C, e pesagem das massas em todas as fases do procedimento. Para os cálculos de teor utilizou-se as Equações 4 e 5 para misturas binárias, adaptadas conforme Equações 6 e 7, considerando calcário e quartzo dessa vez. Como o quartzo não apresenta perda de massa quando submetido a temperatura de 1000° C (resultado do ensaio termogravimétrico), a fração de resíduo mássica (f_{quartzo}) é igual a 1, evidenciando sua elevada estabilidade térmica e comportamento inerte (Santana, 2017).

$$T_{\text{calcário}} = \frac{\rho_{\text{calcário}} \times (\rho_{\text{mix}} - \rho_{\text{quartzo}})}{\rho_{\text{mix}} \times (\rho_{\text{calcário}} - \rho_{\text{quartzo}})} \quad (6)$$

Sendo:

ρ_{mix} : massa específica da mistura (flotado ou afundado) [g/cm³];

$\rho_{\text{calcário}}$: massa específica do calcário determinado experimentalmente por picnometria [g/cm³];

ρ_{quartzo} : massa específica do quartzo determinado experimentalmente por picnometria [g/cm³].

$$T_{\text{calcário}} = \frac{q - 1}{f_{\text{calcário}} - 1} \quad (7)$$

Sendo:

$f_{\text{calcário}}$: fração mássica residual determinada experimentalmente por ATG.

A recuperação mássica foi determinada pela Equação 8, indica quanto da massa inicial foi para o concentrado (depende da flotação direta ou reversa), independente do teor.

$$R_{\text{mássica}} = \frac{m_{\text{concentrado}}}{m_{\text{alimentação}}} \quad (8)$$

A recuperação metalúrgica (Equação 9) é o indicador de eficiência do processo, representa a massa do constituinte de interesse recuperada no concentrado em relação à massa total do mesmo constituinte na alimentação. Para obter um concentrado de alto teor, perde-se material (baixa recuperação), a recuperação metalúrgica ajuda a encontrar o ponto de equilíbrio ideal.

$$R_{\text{metalúrgica}} = \frac{m_{\text{concentrado}} \times t_{\text{calcário}}}{m_{\text{alimentação}} \times t_{\text{alimentação}}} \quad (9)$$

Onde:

$t_{\text{calcário}}$: teor de calcário no concentrado [%];

$t_{\text{alimentação}}$: teor de calcário na alimentação [%].

O Índice de Seletividade de Gaudin (1939) é utilizado para expressar a eficiência da separação entre o mineral de interesse e a ganga, sendo calculado pela média geométrica das recuperações relativas (Equação 10). Valores maiores de IS significam que o processo favorece fortemente o mineral útil em relação à ganga.

$$IS = \sqrt{\frac{T_{\text{calcário (concentrado)}} \times T_{\text{quartzo (rejeito)}}}{T_{\text{quartzo (concentrado)}} \times T_{\text{calcário (rejeito)}}}} \quad (10)$$

Determinou-se a flotabilidade modificada para misturas (Equação 11), a fim de analisar o arraste de cada mineral para superfície, em mistura binária, se eficiente o uso de depressores.

$$Flotabilidade_{mod} = \frac{m_{\text{flotado}} * teor_{\text{flotado}}}{massa \text{ do mineral}_{\text{alimentação}}} \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quarteamento

Durante o processo de homogeneização e quarteamento, observou-se que as massas iniciais de calcário e quartzo foram sucessivamente reduzidas e distribuídas de forma representativa em alíquotas menores, garantindo a representatividade dos ensaios subsequentes. Para o calcário, as massas obtidas nas etapas de duplicata variaram entre 51,43 g e 53,43 g. O quartzo, as duplicatas apresentaram valores entre 42,32 g e 45,00 g. As diferenças percentuais permaneceram dentro do limite aceitável de 5% de erro, confirmando a adequação do procedimento. Além disso, as triplicatas realizadas em ambas as amostras forneceram massas superiores ao mínimo exigido pelo volume do picnômetro de 50 mL (aproximadamente 49,47 g para o calcário e 42,24 g para o quartzo), assegurando a consistência dos resultados. Dessa forma, a homogeneização e o quarteamento se mostraram eficazes para a preparação das amostras, minimizando vieses e possibilitando análises reprodutíveis. Representação dos dados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Quarteamento: calcário dolomítico.

Item	A (g)	B (g)	Observações
Massa inicial	797,46	-	5% de A: 39,87 g
1º corte	394,70	401,70	5% de B: 20,09 g
2º corte	208,96	192,78	5% de A: 10,45 g
3º corte	103,66	105,31	5% de B: 5,27 g
Duplicata	53,43	51,43	
Triplicata (massas utilizadas para picnômetro)	51,43; 53,43; 54,03	-	Mínimo exigido: 16,49 g x 3 = 49,47 g (picnômetro 50 mL)

Fonte: Autor (2025).

Tabela 4 – Quarteamento: quartzo.

Item	A (g)	B (g)	Observações
Massa inicial	641,56	-	5% de A: 32,08 g
1º corte	317,41	324,16	5% de B: 16,21 g
2º corte	168,00	156,16	5% de A: 8,40 g
3º corte	80,60	87,54	5% de B: 4,38 g
Duplicata	42,32	45,00	
Triplicata (massas utilizadas para picnômetro)	45,00; 42,32; 42,31	-	Mínimo exigido: 14,08 g x 3 = 42,24 g (picnômetro 50 mL)

Fonte: Autor (2025).

Preparação dos reagentes

As concentrações desejadas para os reagentes foram baseadas em Milhomem (2020). Contudo, utilizou-se aproximações dos dados, de forma a adequá-lo aos objetivos e às condições específicas deste trabalho. Para o coletor e depressor (alginato), as concentrações utilizadas foram, 170,5 mg/L e 50 mg/L, respectivamente.

Resultando em concentrações equivalentes a 619,34 g/t para o oleato de sódio e 181,67 g/t para o alginato, sendo o somatório das massas das amostras 30 g. Enquanto o extrato sólido de efluente de pinhão obteve uma concentração de compostos sólidos de 9,41 g/L, o que resulta em uma concentração em gramas por toneladas de minério de 34189,67 g/t.

Picnometria

Os ensaios com picnômetros foram realizados para a determinação das massas específicas das amostras, utilizando álcool 70% (massa específica determinada em 0,8654 g/cm³) em função das dificuldades de formação de bolhas e espumas durante o ensaio com água. Esse valor está de acordo com a faixa de massa específica relatada na literatura para soluções hidroalcoólicas a 70% (p/p), que variam entre 0,863 g/cm³ e 0,867 g/cm³ entre 20° C e 25° C, dependendo do grau de pureza do etanol e da proporção exata de diluição (Cancian, 2013).

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5 e 6 a seguir, contendo as massas medidas em cada etapa, a massa específica calculada e os valores médios obtidos, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação (C.V).

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de picnometria: calcário dolomítico.

	1	2	3	Média
Massa Picnômetro (g)	27,0556	37,6515	26,728	
Picnômetro + Amostra (g)	81,0856	91,0815	78,158	
Picnômetro + Amostra + Álcool (g)	115,8006	118,81407	105,1093	
Picnômetro + Álcool (g)	78,3952	81,8846	69,4974	
Massa específica do álcool (g/cm ³)		0,8654		
Massa específica do álcool (kg/m ³)		865,4		
Massa Específica (g/cm³)	2,8126	2,8022	2,8137	2,8095
Massa Específica (kg/m³)	2812,6	2802,2	2813,7	2809,5
Desvio padrão			6,3191	
C.V (%)			0,22%	

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de picnometria: quartzo.

	1	2	3	Média
Massa Picnômetro (g)	25,7194	28,1778	27,7769	
Picnômetro + Amostra (g)	70,7194	70,4978	70,0869	
Picnômetro + Amostra + Álcool (g)	100,3507	99,6339	98,6874	
Picnômetro + Álcool (g)	70,1553	71,2608	70,3903	
Massa específica do álcool (g/cm ³)		0,8654		
Massa específica do álcool (kg/m ³)		865,4		
Massa Específica (g/cm³)	2,6305	2,6259	2,6130	2,6231
Massa Específica (kg/m³)	2630,5	2625,9	2613,0	2623,1
Desvio padrão			9,0899	
C.V (%)			0,35%	

Fonte: Autor (2025).

Para comparar os valores de massas específicas determinadas no presente estudo, consultou-se os dados de mineralogias na literatura. Segundo Johnson e Olhoeft (1984), seleções de propriedades físicas de minerais mostram que o quartzo apresenta massa específica típica em torno de 2,65 g/cm³. Conforme Webmineral (2025), mostra uma média de 2,62 g/cm³. A dolomita, por sua vez, tem massa específica que varia entre 2,80 g/cm³ a 2,90 g/cm³, e média de 2,84 g/cm³ (Webmineral, 2025; Johnson e Olhoeft, 1984). A calcita tem massa específica de 2,71 g/cm³ (Webmineral, 2025).

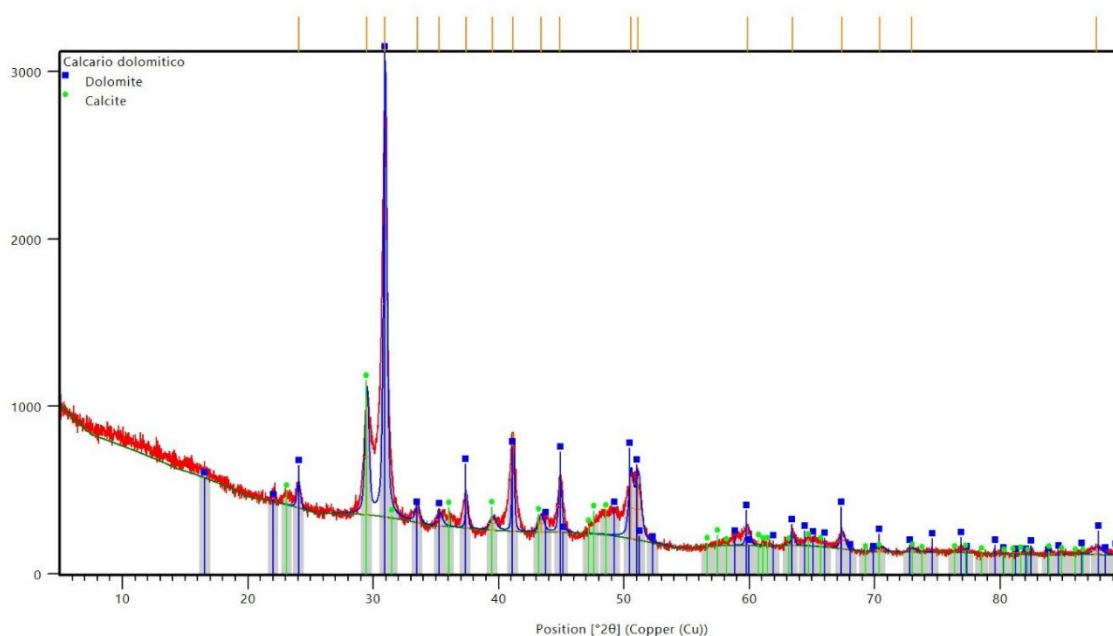
O valor da massa específica obtido para a amostra em estudo, igual a 2,81 g/cm³, é compatível com materiais carbonáticos ricos em dolomita, indicando que o material analisado pode ser classificado como um calcário dolomítico, podendo assumir valores ligeiramente inferiores em amostras naturais devido à presença de impurezas, substituições isomórficas e porosidade inerente à rocha. Assim, o valor experimental encontra-se em concordância com os dados reportados para calcários dolomíticos naturais, que reforça os resultados obtidos nas etapas seguintes dos ensaios de calcinação e análise termogravimétrica, que também apontam para uma composição rica em dolomita.

Difratometria de raios X (DRX)

As condições operacionais adotadas permitiram a obtenção de difratogramas com resolução suficiente para a identificação das fases cristalinas constituintes do calcário dolomítico.

O difratograma (Figura 31) exibe um pico bem definido, de alta intensidade (conforme altura em relação ao eixo vertical) e estreito, indicando boa cristalinidade da amostra. O pico mais intenso está associado à dolomita, especialmente na região de 2θ (eixo horizontal) próximo a 31° . Esse comportamento confirma a dolomita como a fase mineralógica dominante do calcário estudado, em conformidade com outros difratogramas obtidos de estudos com dolomita de autores como Gomes (2022) e Mohammed *et al.* (2013). Além disso, são identificados picos secundários atribuídos à calcita, com intensidades inferiores às da dolomita. Segundo Sampaio e Almeida (2008), a coexistência dessas duas fases é característica de calcários dolomíticos, nos quais ocorre substituição parcial do cálcio por magnésio na estrutura carbonática.

Figura 31 – Difratograma do calcário dolomítico.



Fonte: Autor (2025).

Calcinação por forno mufla

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de calcinação são apresentados na Tabela 7, na qual se observa a eficiência do processo por meio da perda de massa das amostras. Segundo Sampaio e Almeida (2008), a calcinação do carbonato de cálcio puro (calcita) promove a decomposição térmica do CaCO_3 , resultando na formação de óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2), com uma perda de massa teórica em torno de 44%, associada à liberação do CO_2 . Para carbonatos magnesianos, como a dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$, essa perda pode atingir aproximadamente 48%, devido à decomposição simultânea dos carbonatos de cálcio e magnésio, caracterizando a chamada perda ao fogo (PF) ou perda por calcinação (PPC).

Tabela 7 – Perda ao fogo (calcinação do calcário dolomítico).

Amostras	Massa inicial (g)	Após 120°C (g)	Após 900°C (g)	Perda de voláteis (%)	PPC (%)	Perda total (%)
1^a	5,0013	5,0001	2,7534	0,02	44,93	44,95
2^a	5,0005	4,9988	2,7469	0,03	45,05	45,07
3^a	5,0027	4,9882	2,7278	0,29	45,31	45,47

Fonte: Autor (2025).

No presente estudo, as três amostras analisadas apresentaram perdas de massa situadas entre 45,0% e 45,5% após a calcinação. Esses valores são superiores à perda teórica esperada para a calcita pura e inferiores àquela associada à dolomita pura, indicando um comportamento intermediário. Tal resultado é consistente com a presença simultânea de fases calcíticas e dolomíticas, permitindo a classificação do material como calcário dolomítico.

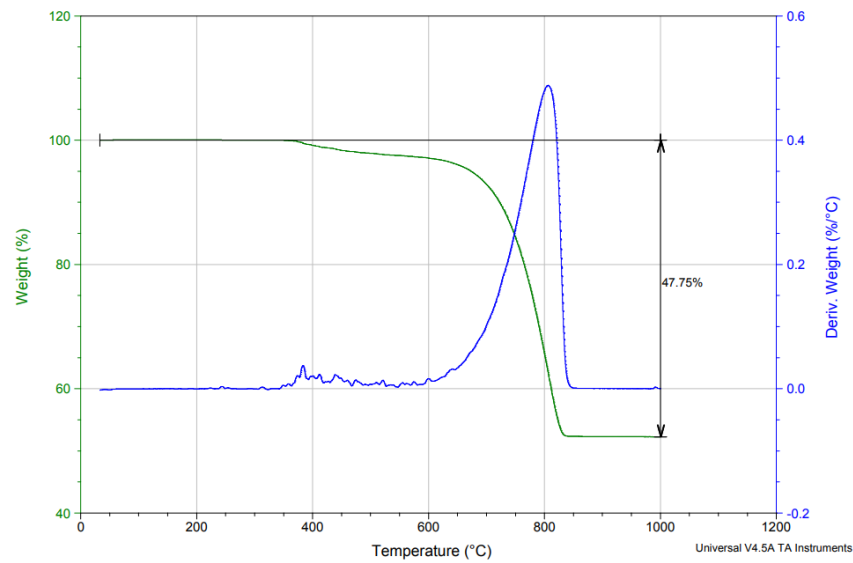
Análise termogravimétrica (ATG)

Segundo Muniz (2024), a análise por termogravimetria (ATG) apresenta maior praticidade e grau de automação, permitindo o controle contínuo e preciso da temperatura e da atmosfera durante o ensaio, o que favorece a obtenção de resultados mais reprodutíveis e representativos.

A curva termogravimétrica, apresentada na Figura 32, mostra que a amostra de calcário dolomítico manteve praticamente sua massa inicial (87,38 mg) até aproximadamente 300° e 350° C, seguida por uma queda acentuada de massa até cerca de 850° C, totalizando uma perda de massa de 47,75 %. Esse comportamento é típico de materiais carbonatados submetidos à calcinação, onde a massa perdida corresponde principalmente ao CO₂ liberado pela decomposição dos carbonatos e formação de óxidos (Samtani *et al.*, 2001).

A curva diferencial apresenta um pico bem definido nessa faixa de temperatura (600° C a 850° C), indicando a máxima taxa de perda de massa e confirmando que a decomposição ocorre predominantemente em um único evento térmico, típico de dolomitas naturais submetidas a aquecimento contínuo em atmosfera pura em nitrogênio (N₂). Esse comportamento está de acordo com a literatura que descreve a decomposição da dolomita entre 650 °C e 850 °C, com formação de CaO e MgO, resultando na liberação de dióxido de carbono (Valverde *et al.*, 2015).

Figura 32 – Termograma do dolomito.

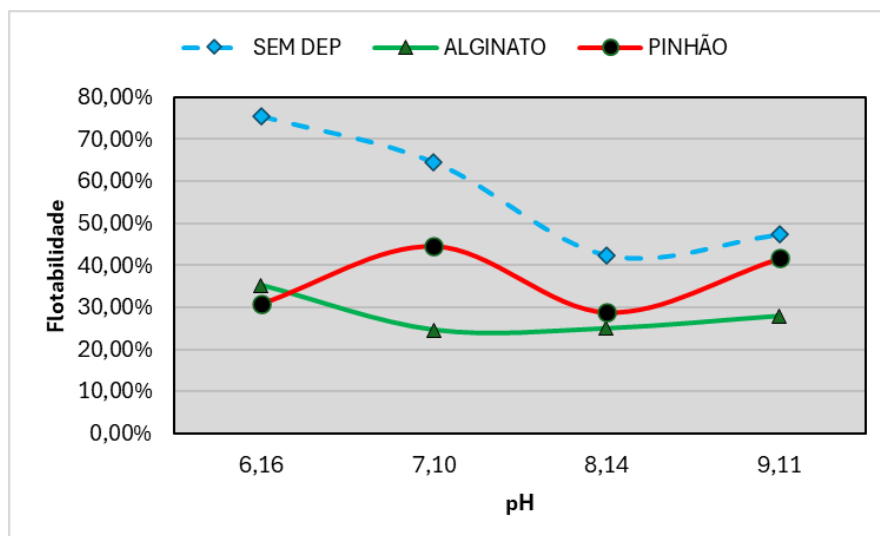


Fonte: Autor (2025).

Ensaio de microflotação

A flotabilidade representa a tendência das partículas minerais a se tornarem hidrofóbicas e a se fixarem às bolhas de ar, ascendendo à superfície. Este comportamento depende diretamente da interação químico-física da superfície mineral com o coletor e com o meio (Santos, 2011). A fim de analisar a flotabilidade do dolomito em todos os ensaios de microflotação, utilizou-se a Equação 11, por se tratar de uma mistura entre mineral de interesse e de ganga, e não separadamente, devido as concentrações de cátions na solução em função do pH, apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Flotabilidade do dolomito para todos os ensaios de microflotação.

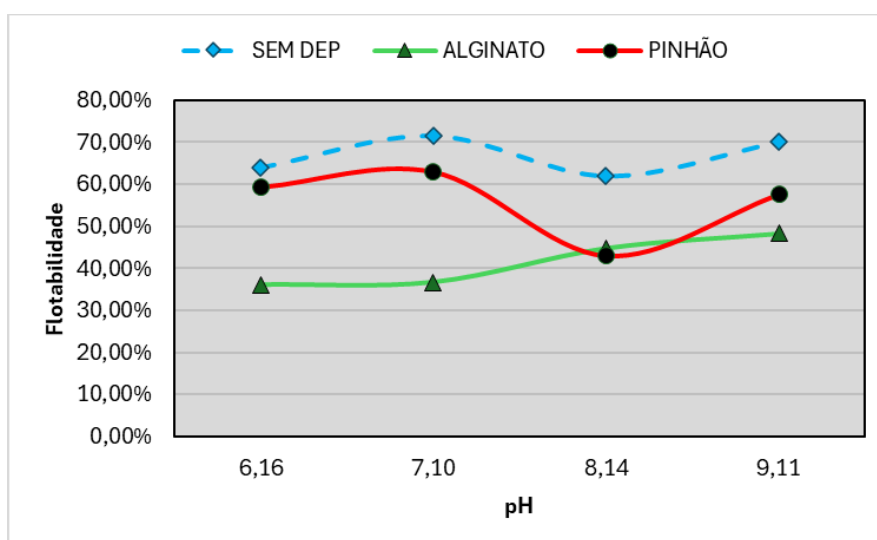


Fonte: Autor (2025).

A flotabilidade dos carbonatos para o sistema sem depressor é expressamente maior em termos percentuais, com destaque para o pH 6,16, devido as concentrações das espécies Mg^{2+} e Ca^{2+} favorecerem a adsorção do coletor em sua superfície. Entretanto, o alginato reduziu a flotabilidade dos minerais carbonáticos abaixo de 40%, indicando uma forte atuação como depressor, conforme aumento do pH. O efluente de pinhão, por sua vez, oscilou sua capacidade de reduzir a flotabilidade, sendo eficiente como agente depressor aos pH 6,16 e 8,14, e, menos eficiente aos pH 7,10 e 9,11.

Para o quartzo, a flotabilidade foi maior em relação ao dolomito, com destaque para o ensaio na ausência de depressor, conforme Figura 34.

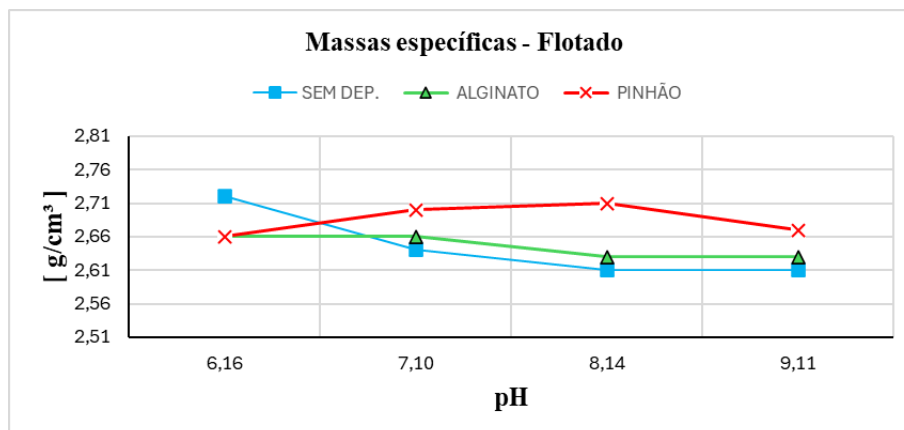
Figura 34 – Flotabilidade do quartzo para todos os ensaios de microflotação.



Fonte: Autor (2025).

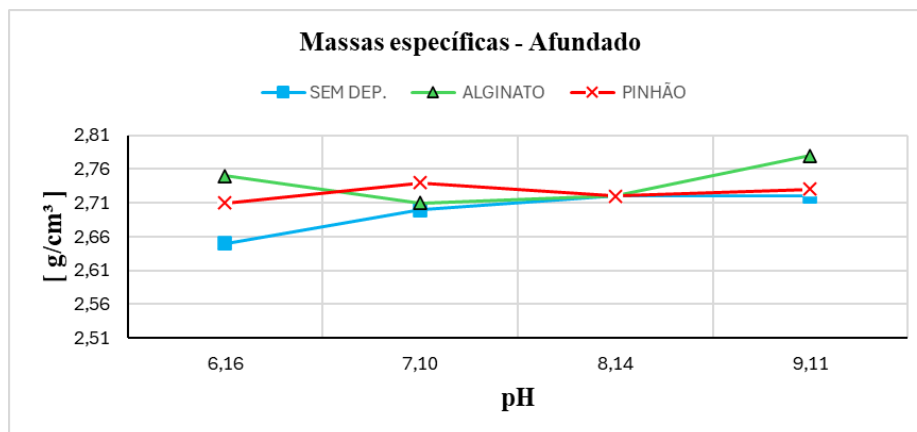
No entanto, somente o parâmetro de flotabilidade não é suficiente para determinar seletividade do sistema, apesar de complementar e ser de grande relevância para entender o desempenho. Logo, após cada ensaio as massas flotadas e afundadas foram filtradas em papel-filtro e levadas para secagem em estufa, as massas secas foram pesadas em balança de precisão e após registro das massas e observação das perdas durante o processo, realizou-se os ensaios de picnometria para determinar as massas específicas, conforme Equação 3, apresentadas nas Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Resultados de picnometria de todos os ensaios de microflotação (flotado).



Fonte: Autor (2025).

Figura 36 – Resultados de picnometria de todos os ensaios de microflotação (afundado).



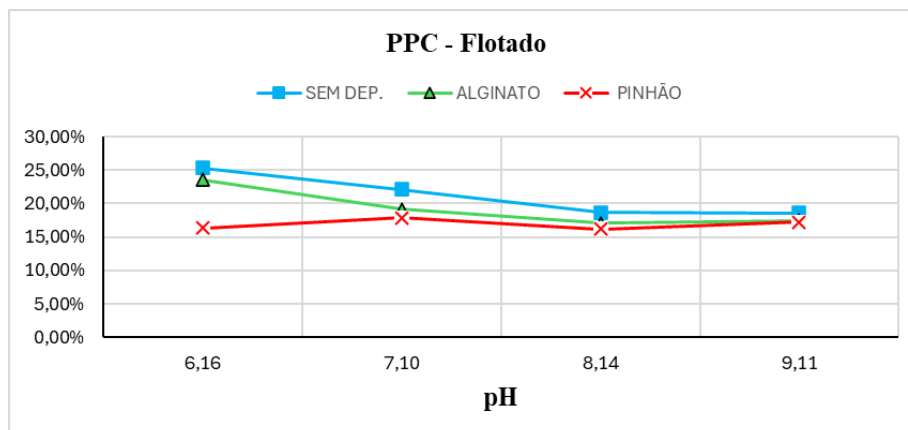
Fonte: Autor (2025).

No flotado, ao pH 6,16, somente o ensaio sem depressor apresentou uma maior massa específica em relação aos demais e a massa específica teórica do quartzo. Contudo, ao elevar o pH as massas específicas deste mesmo ensaio caem, assemelhando-se ao quartzo, enquanto os ensaios com depressores não ultrapassam o limite de 2,71 g/cm³, conforme picnometria.

No afundado, os ensaios com depressores indicaram massas específicas superiores aos ensaios sem depressor, sendo maiores ou iguais a 2,71 g/cm³, assumindo pequenas variações inversamente proporcionais entre si, e, somente ao pH 9,11 que o ensaio com alginato teve maior destaque, aumento da massa específica.

Em seguida, as massas foram secadas novamente, pesadas e levadas ao forno mufla a fim de obter as percentagens de perdas por calcinação (Figuras 37 e 38) para determinar de forma mais precisa os parâmetros como, teor, recuperação e entre outros.

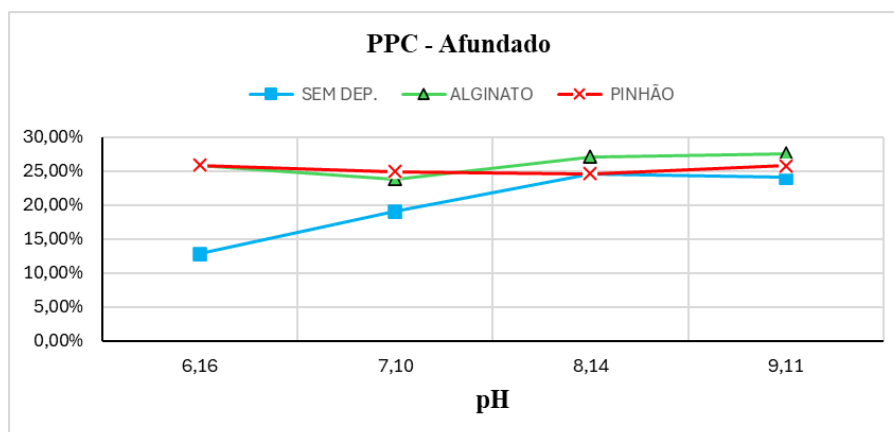
Figura 37 – Resultados de PPC de todos os ensaios de microflotação (flotado).



Fonte: Autor (2025).

No flotado, se teve a maior perda de massa no ensaio sem depressor para o pH 6,16, em conformidade com a massa específica obtida na etapa anterior, indicando uma flotação direta, com ressalva aos parâmetros calculados na etapa seguinte para melhor conhecimento. Contudo, o ensaio com alginato obteve resultado muito próximo. O ensaio com efluente, por sua vez, não ultrapassou uma percentagem de 18,50%.

Figura 38 – Resultados de PPC de todos os ensaios de microflotação (afundado).



Fonte: Autor (2025).

No afundado, maiores perdas foram alcançadas a partir do pH 8,14 para todos os ensaios de microflotação. Entretanto, somente os ensaios com uso de depressores alcançaram maiores perdas ao pH menor ou igual a 7,10. Os ensaios com uso de depressores obtiveram resultados com baixa variação entre si, numa faixa em volta de 25% de perda.

Determinação de parâmetros

Foi analisado a diferença entre os métodos de PPC por ATG e por forno mufla. A diferença de PF está entre 2,44 e 2,82 pontos percentuais entre os métodos, ou seja, cerca de 5% associado as massas finais (como se a massa final no método termogravimétrico perdesse 5% a mais no resíduo em relação ao forno mufla). Estudos indicam que, a ATG frequentemente apresenta maior sensibilidade à liberação total de CO₂, devido ao controle da atmosfera e maior precisão na termobalança, enquanto o forno mufla pode subestimar ligeiramente a PPC devido às limitações cinéticas e operacionais (Muniz, 2024; Valverde *et al.*, 2015).

Desse modo, a ATG mostra-se mais adequada e precisa como referência para determinação da PPC, sendo preferencialmente adotado como a perda de massa (47,75%) no cálculo de teor de dolomita na amostra de calcário dolomítico, conforme Equação 4. Sendo assim, o teor de dolomita é de 93,75%, enquanto o teor de calcita é de 6,25%.

O resultado obtido pelo ensaio de picnometria indicou um teor de 77,74% de dolomita na amostra, enquanto o teor de calcita foi de 22,26%, conforme Equação 5. Esses valores evidenciam uma predominância de dolomita, porém inferior a 93,75% via ATG. A diferença observada entre os resultados pode ser atribuída aos princípios distintos que regem cada método. A picnometria baseia-se na massa específica média da amostra, sendo sensível à presença de porosidade, temperatura e calibração dos equipamentos, fatores que tendem a reduzir a precisão na estimativa quantitativa dos constituintes carbonáticos.

Assim, o resultado mais elevado de teor de dolomita obtido pela ATG é considerado mais representativo da composição real da amostra, enquanto a picnometria desempenha um papel complementar, útil para comparação e revalidação da classificação do calcário como dolomítico.

No entanto, para determinar o teor de calcário dolomítico na mistura pós ensaios de microflotação, utilizou-se a Equação 7, devido maior precisão em método por calcinação ao invés de picnometria.

A recuperação mássica (R_{mássica}) foi determinada para indicar do quanto da massa inicial foi para o concentrado, conforme Equação 8. Nesse presente estudo, desejou-se uma flotação reversa (mineral de interesse permanece na polpa) para o dolomito, enquanto o quartzo (ganga) é liberado na espuma.

Após análise dos resultados obtidos por meio dos cálculos de teores, determinou-se a recuperação metalúrgica (R_{metal}), conforme Equação 9, considerando as massas da alimentação e do produto juntamente com seus teores. Nesse sentido, fornece uma medida que representa o metal efetivamente recuperado em relação ao total disponível na alimentação, espelhando as perdas materiais no processo.

Além da recuperação, determinou-se o índice de seletividade (IS) de Gaudin (1939), conforme Equação 10, para avaliar a eficiência da separação entre os minerais.

Os resultados estão disponíveis a seguir, para cada ensaio de microflotação conforme os tipos de reagentes e variação de pH.

Ensaio de microflotação sem depressor

A Tabela 8 apresenta os teores, as recuperações mássicas e metalúrgicas e os índices de seletividade do dolomito no afundado em diferentes faixas de pH, utilizou-se apenas o coletor.

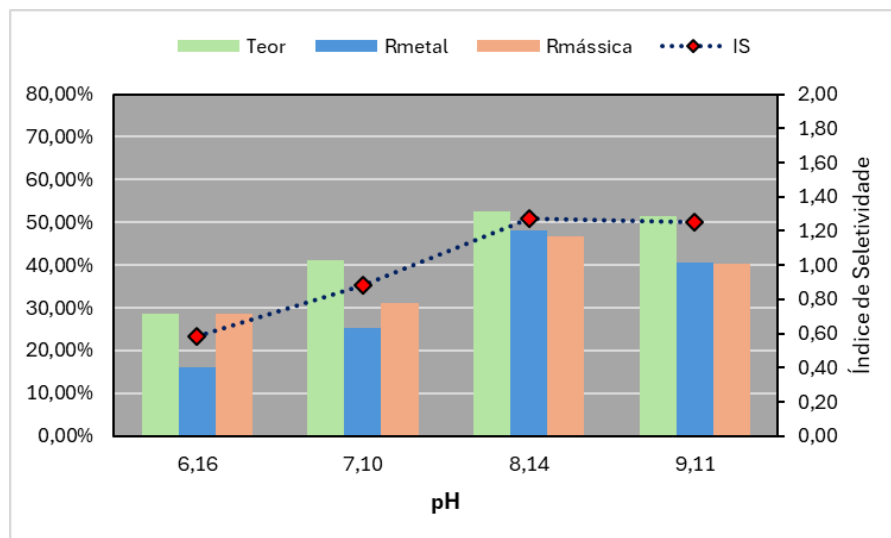
Tabela 8 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (afundado).

pH	Teor	Rmássica	Rmetal	IS
6,16	28,55%	28,72%	16,04%	0,58
7,10	41,04%	31,07%	25,16%	0,88
8,14	52,54%	46,72%	48,12%	1,27
9,11	51,36%	40,29%	40,68%	1,25

Fonte: Autor (2026).

De acordo com os dados da tabela, ao pH 8,14, o ensaio se destaca como a maior recuperação mássica e metalúrgica entre os demais resultados, como também o teor e o IS. Este comportamento foi influenciado pela ação do pH neste intervalo, que resultou na maior depressão do dolomito frente as outras faixas de pH. Contudo, nas faixas de pH de caráter neutro (7,10) a ácido leve, os índices de seletividade assumiram valores menores que 1 e baixas recuperações, indicando uma péssima eficiência no processo para flotação reversa. Os resultados desses parâmetros são também apresentados na Figura 39.

Figura 39 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (afundado).



Fonte: Autor (2026).

Os resultados dos parâmetros para o dolomito no flotado são apresentados na Tabela 9.

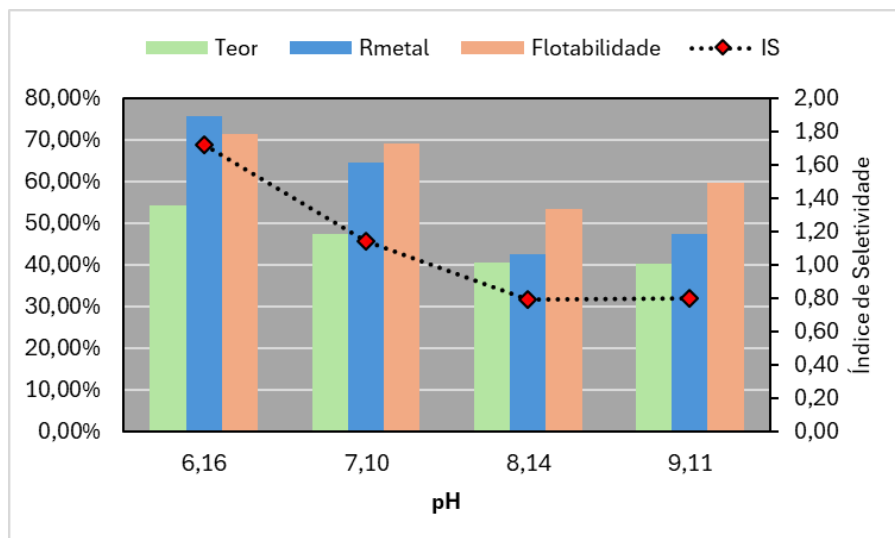
Tabela 9 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (flotado).

pH	Teor	Flotabilidade	Rmetal	IS
6,16	54,13%	71,28%	75,49%	1,72
7,10	47,44%	68,93%	64,55%	1,14
8,14	40,65%	53,28%	42,46%	0,79
9,11	40,35%	59,71%	47,36%	0,80

Fonte: Autor (2026).

Os dados indicam que, ao pH 6,16, a recuperação, o teor e o IS são superiores aos demais parâmetros em faixas mais elevadas de pH. Indica uma boa flotabilidade para o dolomito e, possivelmente, uma flotação do tipo direta. Enquanto, os intervalos de pH de caráter neutro a básico assume de baixa a péssima eficiência para flotação direta. Os dados são apresentados na Figura 40.

Figura 40 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação sem depressor (flotado).



Fonte: Autor (2026).

Ensaio de microflotação com depressor alginato

Neste sistema, buscou-se avaliar a eficiência do depressor, conforme concentrações mencionadas, em combinação com o oleato de sódio como coletor do quartzo (ganga), objetivando uma flotação seletiva e reversa. A Tabela 10 apresenta os parâmetros calculados para o dolomito no afundado, considera-se o concentrado do balanço de massa. Os resultados desses parâmetros são também apresentados na Figura 41.

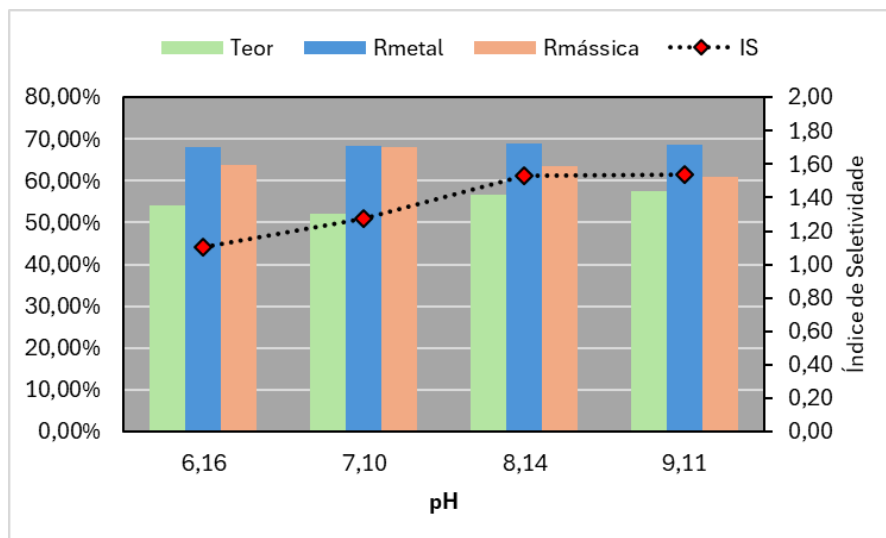
Tabela 10 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação com alginato (afundado).

pH	Teor	Rmássica	Rmetal	IS
6,16	54,23%	63,76%	68,06%	1,10
7,10	52,14%	68,18%	68,49%	1,27
8,14	56,72%	63,54%	68,99%	1,53
9,11	57,69%	60,93%	68,58%	1,54

Fonte: Autor (2026).

Conforme a tabela, encontra-se valores percentuais mais significativos em comparação com os ensaios sem o uso de depressor, verifica-se a eficiência do processo de separação sob ação do alginato em deprimir o dolomito na polpa, com ênfase para os pH 8,14 e 9,11, que atingiram maiores índices de seletividade e maiores recuperações metalúrgicas. Observa-se também, a evolução dos parâmetros ao aumentar o pH, diminuiu-se a eficiência de separação e recuperação na faixa de pH 6,16.

Figura 41 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação com alginato (afundado).



Fonte: Autor (2026).

Esses efeitos são consistentes com a literatura de beneficiamento mineral, na qual reagentes depressores e controle de pH são fatores críticos para maximizar seletividade e eficiência metalúrgica (Gaudin, 1957; Wills e Finch, 2016).

Ensaio de microflotação com efluente de pinhão como depressor

Nesta etapa, utilizou-se o efluente de pinhão como depressor alternativo em combinação com o oleato de sódio como coletor, para avaliar a eficiência do tanino presente no efluente, desconhecida a concentração do mesmo, no processo de separação de espécies minerais. Desejou-se por característica própria do tanino, deprimir os carbonatos na polpa, enquanto o coletor flota o quartzo por meio da adsorção às bolhas de ar e liberado na espuma (flotado). Os resultados dos parâmetros deste sistema estão apresentados na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 – Resultados em tabela dos parâmetros para o ensaio de microflotação com efluente de pinhão (afundado).

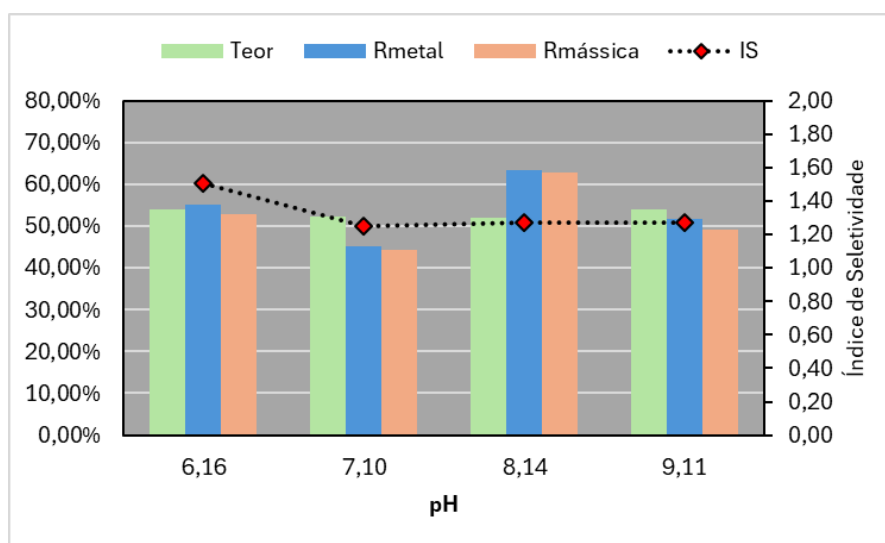
pH	Teor	Rmássica	Rmetal	IS
6,16	54,19%	53,06%	55,24%	1,51
7,10	52,40%	44,47%	45,12%	1,25
8,14	51,94%	62,97%	63,39%	1,27
9,11	54,02%	49,18%	51,85%	1,27

Fonte: Autor (2026).

De acordo com os dados, ao pH 8,14, a recuperação metalúrgica é a maior entre as demais, por outro lado, o índice de seletividade maior alcançou-se em pH 6,16. Uma análise comparativa com o alginato, mostra-se satisfatório ao processo de separação o uso do efluente

de pinhão, de modo que, as mesmas faixas de pH dos dois ensaios com depressores obtiveram comportamentos similares de eficiência para flotação reversa. Além disso, em circuitos de flotação industriais, é possível maximizar a seletividade do sistema com menores custos econômicos em reagentes no processo. Vale ressaltar que, ao pH de caráter neutro obteve-se o menor IS e as menores recuperações entre os outros ensaios. Encontra-se esses parâmetros, apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de microflotação com efluente de pinhão (afundado).



Fonte: Autor (2026).

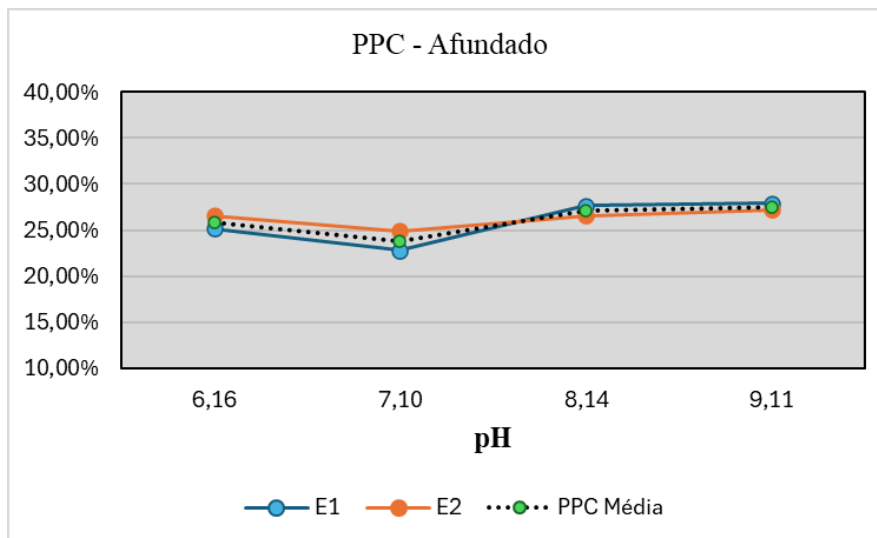
Portanto, o efluente de pinhão como depressor mostrou-se intermediário em relação aos demais ensaios. Mesmo que, não conhecida a concentração e tipo do tanino, a literatura confirma, como descrito anteriormente, a presença do fenólico na semente do pinhão e na água de cozimento, e, é comumente utilizado como depressor de carbonatos em sistemas de flotações.

Na microflotação, as perdas de massas ocorrem por diversos motivos como, manuseio e limpeza da célula de flotação, mudança de recipiente e aderência das amostras ao papel filtro. Na etapa de calcinação das amostras, fator importante é o tempo de exposição das amostras calcinadas com a atmosfera, por ser um produto instável e reativo com a umidade (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2), as amostras sofrem reidratação e/ou recarbonatação, o que altera sua composição e massa.

Os ensaios de microflotação com uso do alginato realizados em duplicatas (E1; E2), são apresentados nas Figuras 43 e 44 da etapa de perda por calcinação em forno mufla, a fim de

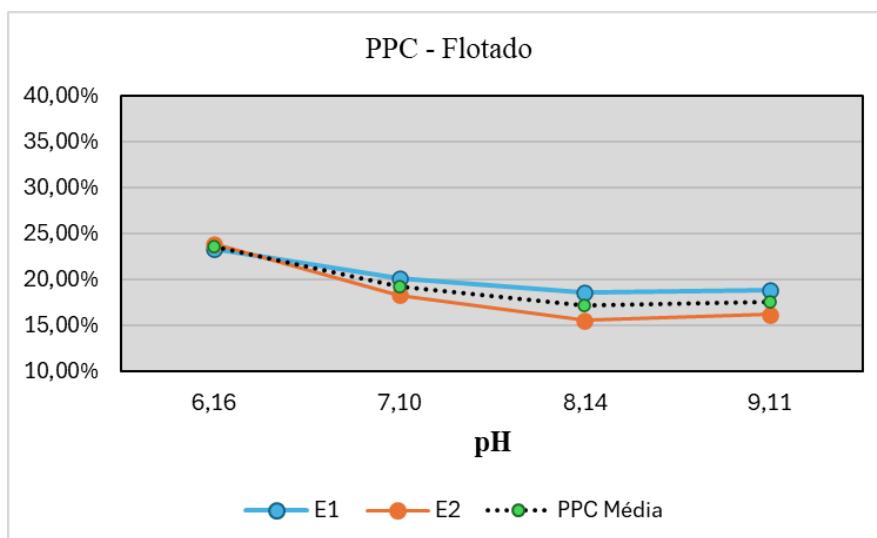
demonstrar representatividade dos resultados, seguindo uma linha de reprodutibilidade e precisão. O qual este estudo teve como foco principal analisar esse tipo de depressor.

Figura 43 - Perdas por calcinação em duplicatas com uso do alginato (afundado).



Fonte: Autor (2026).

Figura 44 - Perdas por calcinação em duplicatas com uso do alginato (flotado).



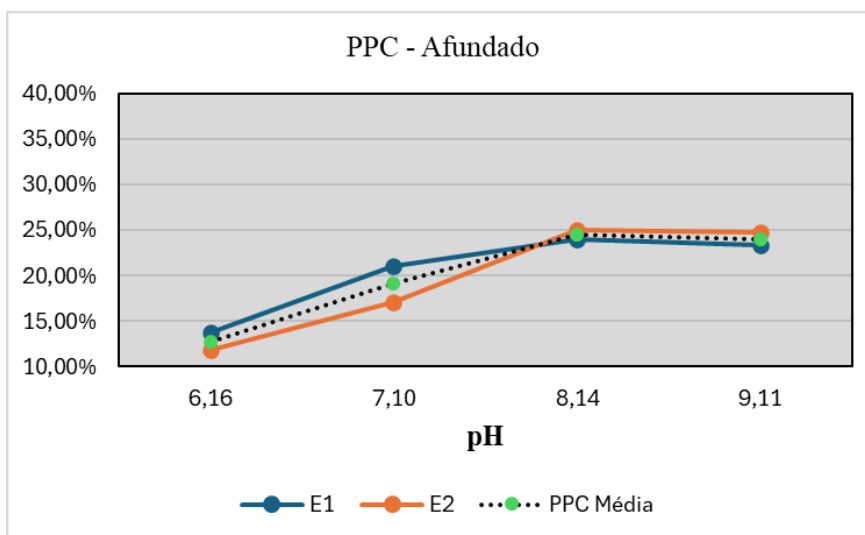
Fonte: Autor (2026).

O ensaio de microflotação com uso do efluente de pinhão não ocorreu em duplicatas devido não ser o foco principal deste estudo, as condições para análise desta pesquisa para esse depressor orgânico devem ocorrer com os recursos de um laboratório de Química orgânica. Logo após o cozimento da semente do pinhão em água à temperatura controlada de 60° C, deve-se verificar o tipo de tanino presente e a sua concentração, registrando também a localização e o clima da região que foi feita a colheita da semente. Feita todas as análises químicas para uma

matéria orgânica, é de suma importância a realização dos ensaios até mesmo em triplicatas, de modo que o estudo ganhe representatividade e reprodutibilidade.

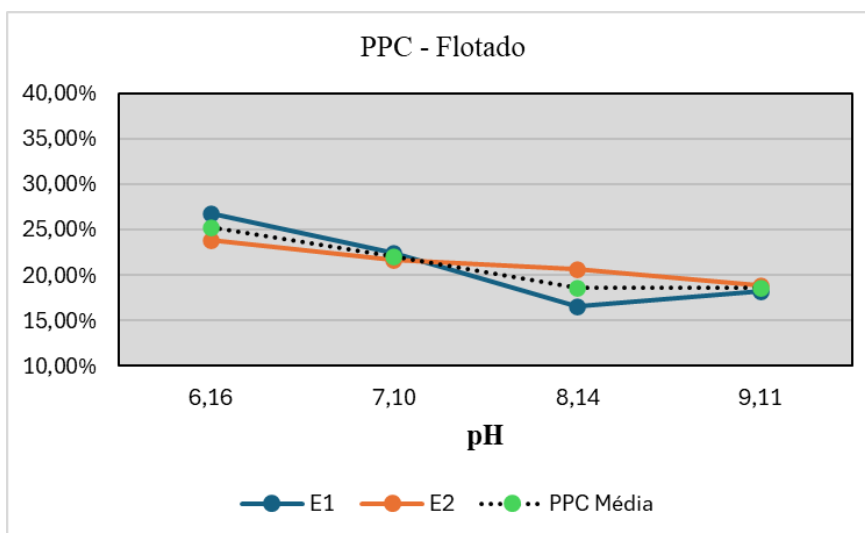
Os ensaios de perda por calcinação em duplicatas na ausência de depressor são apresentados a seguir (Figuras 45 e 46).

Figura 45 - Perdas por calcinação em duplicatas sem uso de depressor (afundado).



Fonte: Autor (2026).

Figura 46 - Perdas por calcinação em duplicatas sem uso de depressor (flotado).



Fonte: Autor (2026).

CONCLUSÃO

No presente estudo, a amostra de calcário foi caracterizada como calcário dolomítico, ou dolomito, em função do elevado teor de dolomita em relação à calcita. Os resultados obtidos por meio dos ensaios de picnometria, difratometria de raios X, calcinação em forno mufla e análise termogravimétrica corroboraram essa classificação. Dentre as técnicas empregadas, destacam-se a difratometria de raios X e a análise termogravimétrica por apresentarem maior precisão, uma vez que consistem em métodos de caracterização tecnológica mais avançados e controlados.

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência da microflotação reversa entre o calcário dolomítico, considerado o mineral de interesse, e o quartzo, como mineral de ganga. Entretanto, os resultados dos ensaios de microflotação realizados na ausência de depressor, em pH 6,16, evidenciaram elevada flotabilidade do calcário dolomítico, resultando em alta recuperação metalúrgica no flotado e um elevado índice de seletividade, o que caracterizou maior eficiência da flotação direta nessas condições. Observou-se que o pH exerceu influência determinante no comportamento do sistema, uma vez que, com o aumento do pH, a flotação tornou-se deficiente, ocorrendo a inversão do processo para flotação reversa, com a depressão do dolomito, porém associada a baixas recuperações metalúrgicas.

Nos ensaios de microflotação com a utilização do alginato como agente depressor, o sistema apresentou elevadas recuperações metalúrgicas no afundado, considerado o concentrado neste caso, bem como altos índices de seletividade. Destacam-se os valores de pH 8,14 e 9,11, nos quais o processo demonstrou maior eficiência para uma flotação reversa. Observou-se, ainda, que o aumento do pH promoveu evolução nos parâmetros de desempenho, resultando em aumento de eficiência de separação e das recuperações metalúrgicas nas faixas de pH mencionadas.

O efluente de pinhão, por sua vez, mostrou-se eficaz como depressor alternativo na flotação reversa de carbonatos. Destacam-se, os valores de pH 6,16 e 8,14, nos quais foram observados os melhores resultados em termos de recuperação metalúrgica e índice de seletividade. Entretanto, ao se avaliar a eficiência global de seletividade e recuperação metalúrgica, em comparação aos sistemas sem depressor e àqueles com o uso do alginato, o efluente de pinhão apresentou desempenho intermediário no contexto de eficiência.

Portanto, ao estabelecer uma classificação dos sistemas avaliados com ênfase na recuperação metalúrgica e no índice de seletividade, destaca-se como mais eficiente o ensaio realizado sem o uso de depressor em pH 6,16, caracterizando uma flotação do tipo direta. Em seguida, o sistema com a utilização do alginato como depressor, no valor de pH 9,11, apresentou desempenho superior dentre os ensaios de flotação reversa. Por fim, na faixa de pH 6,16, o sistema com o efluente de pinhão como depressor alternativo demonstrou eficiência inferior em comparação aos demais citados, mas, ainda muito próximo.

O estudo confirma a viabilidade do uso de reagentes biodegradáveis no processamento de minerais carbonáticos, contribuindo para a separação eficaz de impurezas silicosas e para a diminuição dos custos operacionais.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6473 - **Cal virgem e cal hidratada** – Análise química, 2003.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 8815 **Cal virgem para aciaria - Determinação de reatividade pelo método Wuhrer**, 1989.
- ALBUQUERQUE, Rodrigo Oscar de. **Alternativas de processo para concentração do minério fósforo-uranífero de Itataia**. 2010. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/330a5820-ef21-4990-984a-a07b25bb4509/content> . Acesso em: 26/01/2026.
- ARAUJO, A. *et al.* REVISITANDO AS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE FLOTABILIDADE: **UMA VISÃO CRÍTICA**. Rio Grande do Norte. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320297405_REVISITANDO_AS_TECNICAS_DE_AVALIACAO_DE_FLOTABILIDADE_UMA_VISAO_CRITICA. Acesso em: 26/01/2026.
- BOYNTON, R. S. **Chemistry and Technology of Lime and Limestones**. 2^aed. New Work, Wiley, 1980.
- BROWN, M. E. **Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- CAMPOS, A. R. *et al.* **Calcinação**. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.16, p.727-752. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2186>. Acesso em: 25/01/2026.
- CANCIAM, César Augusto. **Efeito da concentração de etanol na dilatação volumétrica de misturas etanol-água**. Revista de Engenharia e Tecnologia, Ponta Grossa, v. 5, n. 2, p. 99–110, ago. 2013. ISSN 2176-7270. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11483/209209209458>. Acesso em: 02/02/2026.
- CARPIO, R., *et al.* **Estado da arte do processo produtivo da cal na região Centro Oeste de Minas Gerais**. ForScience. 1. 74. 10.29069/forscience.2013v1n1.e49. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321351048_Estado_da_arte_do_processo_produtivo_da_cal_na_regiao_Centro_Oeste_de_Minhas_Gerais. Acesso em: 07/02/2026.
- CARVALHO, M. D. **Correlação das microestruturas de amostras de dolomitas do Quadrilátero Ferrífero, MG com as temperaturas iniciais de hidratação das dolomas**. 2005. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/3f1ae9a4-c8aa-4bd7-9ca7-5d86e49da8e2>. Acesso em: 25/01/2026.
- CASTRILLON, R. G.; HELM, C. V.; MATHIAS, A. L. **Araucaria angustifolia and the pinhão seed: starch, bioactive compounds and functional activity – a bibliometric**

review. Ciência Rural, Santa Maria, v. 53, n. 9, e20220048, 2023. DOI: 10.1590/0103-8478cr20220048. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/7M5w5ytPfynjwdK5GgXRFpv/>. Acesso em: 26/01/2026.

CASTRO, F. H. B.; HOCES, M. C. **Influence of Quebracho and Sodium Silicate on Flotation of Celestite and Calcite with Sodium Oleate.** International Journal of Mineral Processing, vol. 37, p. 283-298, 1993. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993IJMP...37..283H/abstract>. Acesso em: 01/02/2026.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P.F.A. **Flotação.** In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.11. p.465-512. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/744>. Acesso em: 25/01/2026.

CHEN, C.; ZHAO, C.; LIANG, C.; PANG, K. **Calcination and sintering characteristics of limestone under O₂/CO₂ combustion atmosphere.** Fuel Processing Technology. Vol. 88, p. 171-178. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.03.003>. Acesso em: 08/02/2026.

CHEN, G.; TAO, D. **Effect of solution chemistry on flotability of magnesite and dolomite.** International Journal of Mineral Processing. v. 74, n. 1-4, p. 343-357, 2004.

CHEN, W. *et al.* **The effect of sodium alginate on the flotation separation of scheelite from calcite and fluorite.** Minerals Engineering, v. 113, p. 1–7, 2017. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.07.016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687517301966>. Acesso em: 25/01/2026.

CHRISTOFOLETTI, S. R. *et al.* **Os Principais contaminantes minerais das rochas sedimentares e sua influência nas matérias-primas cerâmicas.** Cerâmica Industrial, v.8, n.1, jan./fev. 2003. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657187f8c9d6e028b4691/pdf/ci-8-2-587657187f8c9d6e028b4691.pdf>. Acesso em: 30/01/2026.

CHUDACEK, M. W.; FICHERA, M. A.; ROSA, M. D.; SILVA, R. V. G. **Flotation testing: from pure minerals to real ores.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA. São Lourenço. 1992.

COSTA, J. L. **Seletividade na flotação de minérios feríferos dolomíticos.** 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2607>. Acesso em: 25/01/2026.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction.** 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. Disponível em: [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20-%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20\(2014\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20-%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20(2014).pdf). Acesso em: 02/02/2026.

CUNHA, C. F. R.; GOES, L. F. **Ensaio de calorimetria e análise termogravimétrica em amostras aleatórias e desconhecidas.** 2022. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34529>. Acesso em: 02/02/2026.

CUNHA, I. P. da. et al. **Bioaccessibility of Phenolic Compounds of Araucaria angustifolia from Seed Water Extracts during In Vitro Simulated Gastrointestinal Condition**. Food and Nutrition Sciences. 2018, 9, p. 1137-1146, 2018. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=87716>. Acesso em: 02/02/2026.

CUNHA, Fernanda Teixeira de Alvarenga. **Balanço de massas**. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/3fae1c00-d5d2-4fb7-beef-f158ef28b2d1/content>. Acesso em 29/01/2026.

CUNHA, J; GUIMARÃES, J.E.P.; FERREIRA, B.A.; ROQUETE, B. **Análises de calcário e indústria de cal no Brasil**. In: Boletim 33, do Laboratório da Produção Mineral – LPM/DNPM. 1949.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Paulo, 2012. 48 f. Universidade de São Paulo. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado_Anexo.pdf. Acesso em: 02/02/2026.

Drzymala, J. Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 19-29, 2006. Disponível em: <https://minproc.pwr.edu.pl/materialy/dydaktyka/mp/krzWzb2006.pdf>. Acesso em 08/02/2026.

FUERSTENAU, M. C.; JAMESON, G. J.; YOON, R.-H. **Froth Flotation: A Century of Innovation**. Littleton: SME, 2007. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=8zpjAhBVIC0C&oi=fnd&pg=PP7&ots=UMqWO8bX2p&sig=ijQGnVZcwehLCvnyYPO6Kgd3Hpg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 08/02/2026.

FUERSTENAU, M. C. **An improved micro-flotation technique**. Engineering and Mining Journal; 165(11);108-9. 1964.

FUERSTENAU, M. C. **Froth flotation the first ninety years**. Advances in Flotation Technology, USA Ed. Parket and J. D. Miller, 1999.

GAUDIN, A. M. **Flotation**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1957.

GAUDIN, A.M. **Principles of mineral dressing**. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1939.

GOMES, B.; SALES, F.; da LUZ, J. A. M.; MILHOMEM, F. 2023. **Lagrangian reconciliation of expeditious analyzes on microflotation of hematite and dolomite by carboxylates**. Research, Society and Development. 12. e29912139831. 10.33448/rsd-v12i1.39831. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/367103814_Lagrangian_reconciliation_of_expeditious_analyzes_on_microflotation_of_hematite_and_dolomite_by_carboxylates. Acesso em: 02/02/2026.

GOMES, Bruna de Oliveira. **Microflotação de hematita e dolomita com carboxilatos de origem vegetal**. 2022. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/16075>. Acesso em: 25/01/2026.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1ª Edição, São Paulo. 1998.

- GUNER, M. K.; KOWALCZUK, P. B. **Impact assessment and optimization of REFLUX flotation cell (RFC) primary settings on copper sulfide ore flotation**. Minerals Engineering, v. 233, p. 109653, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/394326690_Impact_assessment_and_optimization_of_REFLUX_flotation_cell_RFC_primary_settings_on_copper_sulfide_ore_flotation. Acesso em: 31/01/2026.
- HANNA, H. S.; SOMASUNDARAN, P. **Flotation of Salt-Type Minerals**. Flotation, A. M. Gaudin Memorial volume, AIME, New York, p.197-272, 1976.
- HECK, N. C. **Calcinação**. Notas de Aula do curso ENG06632-Metalurgia Extrativa dos Metais Não-Ferrosos II-A. Rio Grande do Sul, Brasil: DEMET / UFRGS. 2017.
- JOHN, V. M., KATIA R. G. P., CINCOTTO M. A. **Produção de cal**. Economia De Baixo Carbono: Avaliação De Impactos De Restrições E Perspectivas Tecnológicas Ribeirão Preto-SP. 2014. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/445046406/Producao-de-Cal-EBC-pdf>. Acesso em: 08/02/2026.
- JOHNSON, G. R.; OLHOEFT, G. R. **Density of Rocks and Minerals**. In: **Handbook of Physical Properties of Rocks**. vol. III. Boca Raton: CRC Press: <https://doi.org/10.1201/9780203712030>, 1984.
- KOEHNLEIN, E. A. *et al.* **Antioxidant Activities and Phenolic Compounds of Raw and Cooked Brazilian Pinhão (*Araucaria angustifolia*) Seeds**. African Journal of Food Science, v.6 n.21, p. 512-518, 2012.
- KOESTER, D. L.; REIS, N.; QUAST, L. B. **Valorização da casca do pinhão (*Araucaria angustifolia*) como fonte de compostos fenólicos**. Anais da Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), v. 1, n. 11, 12 out. 2021. Disponível em: <https://portaleventos.uffs.edu.br/index.php/JORNADA/article/view/15913/10153>. Acesso em: 26/01/2026.
- LEAL, A. J. F., *et al.* **Aplicação de calcário e culturas de cobertura na implantação do sistema plantio direto em cerrado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, n. spe, p. 2771–2777, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/1033>. Acesso em: 06/02/2026.
- LEJA, J. **Flotation Surfactants**. In: LEJA, J. **Surface Chemistry of Froth Flotation**. New York: Plenum Press, chapter 5, p. 205-399, 1982. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/201498860/1982-Leja-Surface-Chemistry-of-Froth-Flotation>. Acesso em: 02/02/2026.
- LI, D.; WANG Y.; LI, Z. **Limestone Calcination Kinetics in Microfluidized Bed Thermogravimetric Analysis (MFB-TGA) for Calcium Looping**. Catalysts. 2022; 12(12):1661. <https://doi.org/10.3390/catal12121661>. Acesso em: 02/02/2026.
- LIMA, Charles Santos. **O efeito da calcinação na qualidade do produto final do processo de produção da cal**. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2016. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/tecnologiaemmineracao/files/2019/08/o-efeito-da-calcinacao-na-qualidade-do-produto-final-do-processo-de-producao-da-cal.pdf>. Acesso em: 25/01/2026.

LIPPER, Gunter Chaves. **Rota de processo para concentração de minérios de ferro hidratados**. 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/ef600ece-7261-4d31-a5af-3960be40b9f7/content>. Acesso em: 25/01/2026.

LIU, Q.; ZHANG, Y.; LASKOWSKI, J. S. **The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: an acid/base interaction**. International Journal of Mineral Processing, v. 60, n. 3–4, p. 229–245, 2000. DOI: 10.1016/S0301-7516(00)00018-1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751600000181>. Acesso em: 25/01/2026.

LUZ, J. A. M. **Flotação Aniônica de Rejeito Itabirítico: Estudo de Reagentes Alternativos e Modelamento Polifásico do Processo**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1996.

MEYER, M. F.; BARROS, J. C.; CHAVES, J. M. P.; SILVA, J. P. P. **Influência do método de quarteamento na representatividade das alíquotas de rochas/minério**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC, 2024. Anais... [modalidade Geologia e Minas – Engenharia de Minas], 07 a 10 out. 2024. Disponível em: https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/contecc%202024/GEO/INFLU%C3%8ANCIA_DO_M%C3%89TODO_DE_QUARTEAMENTO_NA_REPRESENTATIVIDADE_DAS_AL%C3%8DQUOTAS_DE_ROCHAS_MIN%C3%89RIO.pdf. Acesso em: 02/02/2026.

MILHOMEM, Felipe de Orquiza. **Cinética de flotação no sistema hematita e quartzo com uso de óleos vegetais**. 2020. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13072>. Acesso em: 02/02/2026.

MILHOMEM, F. de O.; LUZ, J. A. M. da. **Experimentos simples para estudo de granéis**. Holos, Natal, v. 3, p. 114-131, 2016. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/2126>. Acesso em: 02/02/2026.

MOHAMMED, M. A. A.; SALMIATON, A.; WAN AZLINA, W. A. K. G.; MOHAMAD AMRAN, M. S.; TAUFIQ-YAP, Y. H. **Preparation and characterization of Malaysian dolomites as a tar cracking catalyst in biomass gasification process**. Journal of Energy, v. 2013, p. 1-8, 2013. DOI: 10.1155/2013/791582. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2013/791582>. Acesso em: 28/01/2026.

MUNIZ, M. R.; ALCOVER NETO, A. **Comparação da determinação de perda ao fogo por analisador termogravimétrico e forno-mufla**. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INSTITUCIONAL, 13., 2024, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2024. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2935>. Acesso em: 02/02/2026.

NATIVA MINERAÇÃO. **Calcário dolomítico e calcítico**. Nativa Mineração, [s.d.]. Disponível em: <https://www.nativamineracao.com.br/calcario-dolomitico-calcitico>. Acesso em: 02/02/2026.

NUNES, A. P. L.; PERES, A. E. C. **Reagentes depressores de carbonatos: uma revisão**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT), 2011. 47 p. (Série Tecnologia Mineral, STM-89). Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/48/1/stm-89.pdf>. Acesso em: 25/01/2026.

OFORI A. J.; SOMASUNDARAN, P.; ANANTHAPADMABHAN, K.P. **Effects of Dissolved Mineral Species on the Dissolution/Precipitation Characteristics of Calcite and Apatite.** *Colloids and Surfaces.* v. 15, p. 295-307. 1985.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A. **Controle de qualidade da cal para argamassas: metodologias alternativas.** UNICAP, Pernambuco, 2007. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/66666339/Controle-de-Qualidade-Da-Cal-Para-Argamassas-Metodologias-Alternativas>. Acesso em: 09/02/2026.

PEARSE, M. J. **An Overview of the Use of Chemical Reagents in Mineral Processing.** *Minerals Engineering*, v. 18, p. 139-149, 2005. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/10.1016/j.mineng.2004.09.015>. Acesso em: 02/02/2026.

PEREIRA, L. S. **A indústria da cal no Brasil.** In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17., Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/500>. Acesso em: 08/02/2026.

PINTO, Davi Souza. **Estudo Sobre o Processo Produtivo de Cal.** 2023. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química Bacharelado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023. Disponível em: https://sip.prg.ufla.br/publico/trabalhos_conclusao_curso/acessar_tcc_por_curso/engenharia_quimica/index.php?dados=20222201620950. Acesso em: 07/02/2026.

RIBEIRO, Vanda Maria. **Massa cerâmica de resíduos da indústria de cerâmica branca e rejeitos dolomíticos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.cefetmg.br/items/0bfd8894-8ccf-4370-a8a8-2c8f5310f70b>. Acesso em: 02/02/2026.

RUIJTER, M. A. **Particle size effects in the flotation of cassiterite.** [Master's Degree Dissertation]. Faculty of Engineering of University of the Witwatersrand, Johannesburg; 1979.

SAMPAIO, D. A.; *et al.* **Diversity of Secondary Metabolites of *Araucaria* Seed (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze) Residues.** *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 289–292, 2022. DOI: 10.17921/1415-6938.2022v26n2p289-292. Disponível em: <https://ensaioeciencia.pgscogna.com.br/ensaioeciencia/article/view/9599>. Acesso em: 25/01/2026.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Calcário e dolomito.** IN: *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações.* 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 363-387. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1105>. Acesso em: 25/01/2026.

SAMPAIO, J. A. *et al.* **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**/Ed. João Alves Sampaio, Sílvia Cristina Alves França, Paulo Fernando Almeida Braga. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/544>. Acesso em: 02/02/2026.

SAMTANI M. *et al.* **Isolation and identification of the intermediate and final products in the thermal decomposition of dolomite in an atmosphere of carbon dioxide.** *Thermochimica Acta.* Volumes 367–368. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00662-6](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00662-6). Acesso em: 02/02/2026.

SANTANA, Geovana Lira. **Estudo comparativo através da análise de variância para determinação da distribuição granulométrica pelas técnicas de sedimentação e difração a laser**. João Pessoa, PB: Universidade Federal da Paraíba, Curso de Engenharia de Materiais, Monografia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13360>. Acesso em: 02/02/2026.

SANTANA, E. R. R. **Caracterização e Reconstrução mineralógica de carvão, caulim, calcário e de cinzas sulfatadas geradas à temperatura de um leito fluidizado visando sua aplicação na indústria cimenteira**. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2774/000376268.pdf?sequence=1>. Acesso em: 02/02/2026.

SANTOS, Dayane Ferreira. **Flotação de anfibólios com amina primária e sais quaternários de amônio**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/0a035826-0341-4ec9-8879-f586cf3cbe7f/content>. Acesso em: 28/01/2026.

SANTOS, Rafaeli Keila. **Microflotação de apatita, calcita e dolomita utilizando oleato e palmitato de sódio puros e em misturas**. 2024. 2.49 MB. Trabalho de conclusão (Mestrado Profissional em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2024. Disponível em: <https://repositorio.cefetmg.br/handle/123456789/1446>. Acesso em: 25/01/2026.

SCALIZE, P. S.; *et al.* **Aplicação de análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG) em materiais orgânicos usados como adsorventes**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Pernambuco, 2024. *Anais...* [p. 1–7]. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais-eletronicos/46_Download/TrabalhosCompletoPDF/I-119.pdf. Acesso em: 02/02/2026.

SCHNITZLER, E. *et al.* **Proposta de análises rápidas de calcários da região de Ponta Grossa por termogravimetria (TG), comparadas com as titulações complexométricas clássicas**. *Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, Ponta Grossa, v. 6, n. 01, 09 nov. 2009. DOI: 10.5212/publicatio.v6i01.745. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/exatas/article/view/745/662>. Acesso em: 02/02/2026.

SCHUMACHER, B. *et al.* (1990). **Comparison of Three Methods for Soil Homogenization**. *Soil Science Society of America Journal - SSSAJ*. 54. 10.2136/sssaj1990.03615995005400040046x. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/250127330_Comparison_of_Three_Methods_for_Soil_Homogenization. Acesso em: 02/02/2026.

SILVA, L. S. S.; LUZ, J. A. M.; MILHOMEM, F. O. **Cotejando tubo de Hallimond com célula de Fuerstenau**. In: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME, 28., 2019, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ENTMME/UFMG, 2019. p. 18-26. Disponível em: <https://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/095.pdf>. Acesso em: 25/01/2026.

SILVA, Letícia Stéffane Santos. **Comparação de técnicas de microflotação: tubo de Hallimond e célula de Fuerstenau**. 2018. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1565>. Acesso em: 25/01/2026.

SILVA, Rodolfo Rezende. **Liberação do potássio contido em silito glauconítico por processo térmico**. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/fc3014bf-5a3f-4459-bdd0-d520c3d3a071/content>. Acesso em: 02/02/2026.

SOARES, B D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2007. 383 f. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15127>. Acesso em: 25/01/2026.

SOUZA, A. L. de. *et al.* **Use of depressants in the direct flotation of a silicate-carbonate phosphate ore**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 67, n. 2, p. 191–196, 2014. DOI: 10.1590/S0370-44672014000200010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/TP6QyMmXWyVB5yss98GNRjm/>. Acesso em: 25/01/2026.

SOUZA, F.; colaboradores. **Caracterização tecnológica de um calcário dolomítico industrial**. Cerâmica, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/SnMbH6n4RyPSjhRCrbp5tRd/?lang=pt>. Acesso em: 02/02/2026.

TOHRY, A. *et al.* **Tannin: an eco-friendly depressant for the green flotation separation of hematite from quartz**. Minerals Engineering, v. 168, p. 1-11, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687521001461>. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106917. Acesso em: 26/01/2026.

VALVERDE, J. *et al.* **Thermal decomposition of dolomite under CO₂: Insights from TGA and in-situ XRD analysis**. Physical chemistry chemical physics. 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/cp/c5cp05596b>. Acesso em: 25/01/2026.

WANG, L. *et al.* **The depressing role of sodium alginate in the flotation of Ca²⁺-activated quartz using fatty acid collector**. Journal of Molecular Liquids, v. 343, p. 117618, 2021. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.117618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732221023436>. Acesso em: 25/01/2026.

WEBMINERAL. **Calcite Mineral Data**. Mineralogy Database. Disponível em: <https://webmineral.com/data/Calcite.shtml>. Acesso em: 14 dez. 2025.

WEBMINERAL. **Dolomite Mineral Data**. Mineralogy Database. Disponível em: <https://webmineral.com/data/Dolomite.shtml>. Acesso em: 14 dez. 2025.

WEBMINERAL. **Quartz Mineral Data**. Mineralogy Database. Disponível em: <https://webmineral.com/data/Quartz.shtml>. Acesso em: 14 dez. 2025.

WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' Mineral Processing Technology**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

XING, Y.; GUI, X.; KARAKAS, F.; CAO, Y. **Role of collectors and depressants in mineral flotation: a theoretical analysis based on extended DLVO theory**. Minerals, Basel, v. 7, n.

11, p. 223, 16 nov. 2017. DOI: 10.3390/min7110223. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/7/11/223>. Acesso em: 26/01/2026.