

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico dos materiais duros cimentados da  
Mina de Fosfato da Copebrás, GO.”

Autor:

Michelle Fernanda de Lira Teixeira

Orientadora: Dra. Andréia Bicalho Henriques

Agosto de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Michelle Fernanda de Lira Teixeira

“Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico dos materiais duros cimentados da  
Mina de Fosfato da Copebrás, GO.”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,  
Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Dra. Andréia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

Teixeira, Michelle.

M477m Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico dos materiais duros cimentados da mina de fosfato da Copebrás, GO.

[manuscrito] Michelle Fernanda de Lira Teixeira. – 2019.

xxii, 162 f., enc.: il.

Orientadora: Dr. Andréia Bicalho Henriques

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

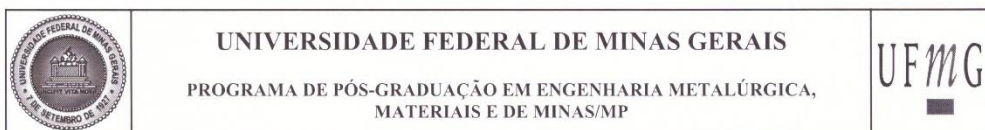
Anexos: f.XXX-XXX.

Bibliografia: f.XXX-XXX.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Engenharia de minas – Teses.  
3. Tecnologia mineral – Teses. I. Orientador. II. Coorientador. III.  
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

IV. Título.

CDU: 669(043)



**ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA  
MICHELLE FERNANDA DE LIRA TEIXEIRA**

Realizou-se, no dia 23 de agosto de 2019, às 09:30 horas, 4240, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico para aproveitamento dos materiais duros cimentados da Mina de Fosfato da Copebrás, GO*, apresentada por MICHELLE FERNANDA DE LIRA TEIXEIRA, número de registro 2017720768, graduada no curso de QUÍMICA INDUSTRIAL, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Andreia Bicalho Henriques - Orientador (UFMG), Prof(a). Roberto Galery (UFMG), Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 23 de agosto de 2019.

  
Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (Doutora)

  
Prof(a). Roberto Galery (Doutor)

  
Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutor)

À minha querida Isadora, sol da minha vida,  
Obrigada por sua doçura e compreensão da vida...

"Tudo que está no plano da realidade já foi sonho um dia"

Leonardo da Vinci

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pois se eu tenho coragem, saúde, conforto e família é devido a permissão dele, agradeço esse cuidado essencial que sustenta a minha vida e sem o qual jamais teria condições de concluir esse trabalho.

Aos meus pais, obrigada pelo amor incondicional e a presença de vocês em minha vida. Obrigada pelo apoio com a Isa nos momentos em que eu precisei me ausentar para os estudos e a trabalho.

Ao meu esposo Alex pela compreensão, apoio e entusiasmo que me impulsionaram e me deram confiança para seguir na direção dos meus sonhos.

À minha filha Isadora por sua paciência, companheirismo e amor.

Aos amigos que acreditaram e que me incentivaram a seguir esse plano, eu senti o amor de vocês em todo esse processo, essa energia foi minha força: obrigada Anna Bellezza, Alessandra Achcar e Patrícia Fonseca pelos diálogos, pelos incentivos e por se importarem comigo, apesar do contato não ser frequente, a conexão é firme sincera e honesta, amo vocês!

À Renata, meu braço direito em casa, cuidou da minha casa, minha família e de mim durante todo esse processo, não tenho como agradecer-lá, saiba que você é muito importante para mim: Obrigada!

À minha orientadora Andréia, que me incentivou e acreditou que em meio a quantidade de coisas que eu tenho para fazer em minha rotina de vida eu conseguiria me dedicar e concluir esse projeto. Obrigada por me puxar e não me deixar procrastinar.

Aos meus colegas de trabalho que me incentivaram e proporcionaram debates que enriqueceram significativamente o desenvolvimento desse trabalho, tenho enorme gratidão à CMOC e a vocês: Talita Chaves, Ricardo Rezende, Gláucio Castro, Bruno Milanezzi, Leonardo Rangel, Alexandre Lourenço, Edimar Teixeira, Sérgio Silva, Guilherme Birro, Gesner Santos, Vanessa Mendes e especialmente ao Felipe Seguin, que teve a sua parcela de dedicação para atender às minhas solicitações e dúvidas frequentes durante o trabalho.

Não poderia deixar de agradecer especialmente à área de Engenharia de Processos, tenho orgulho e acredito em vocês, obrigada José Camargo, Hallyson Marques, Caio Vieira, Lorena Gomes, Wanderson Júnior e Fábio Lucas pelo suporte, apoio e profissionalismo com que empenham as atividades de vocês.

**SUMÁRIO**

AGRADECIMENTOS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	2
2. OBJETIVOS .....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1. Estudos de caracterização de minérios .....	6
3.1.1. Amostragem.....	8
3.1.2. Principais técnicas instrumentais de Caracterização da Apatita .....	9
3.2. Localização da Área Estudada .....	12
3.3. Contexto Geológico .....	13
3.3.1. Geologia Regional .....	13
3.3.2. Geologia do Complexo Catalão I .....	16
3.4. Fosfato.....	21
3.4.1. Apatita.....	24
3.5. Processamento mineral da Apatita .....	28
3.5.1. Liberação de partícula.....	28
3.5.2. Flotação de Apatita .....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1. Testes de Flotação .....	32
4.1.1. Materiais, reagentes e equipamentos .....	32
4.1.2. Procedimento Testes de flotação.....	35
4.2. Ensaio de BWI .....	38
4.2.1. Equipamento.....	38



4.3.	Análises Químicas por Fluorescência de Raios-X.....	39
4.4.	Caracterização de Minérios por Difração de Raios-X .....	39
4.5.	Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura .....	39
4.6.	Análise de Liberação Mineral – MLA .....	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
5.1.	Análise de Fluorescência de raios X para as amostras estudadas .....	42
5.2.	Caracterização Tecnológica Pilha 80/2017 .....	42
5.3.	Caracterização Tecnológica da amostra de cimento de Quartzo .....	47
5.4.	Caracterização Tecnológica da amostra de cimento de Quartzo com Goethita .....	52
5.5.	Caracterização Tecnológica da amostra de Cimento de Apatita.....	56
5.6.	Caracterização Tecnológica da amostra de Cimento de Apatita com Quartzo.....	58
5.7.	Caracterização Tecnológica da amostra de Cimento de Quartzo com Apatita.....	60
5.8.	Caracterização Tecnológica da amostra de Cimento de Apatita com Goethita.....	62
5.9.	Caracterização Tecnológica da amostra de Cimento de Goethita .....	64
5.10.	Testes de flotação em Bancada com adição percentual dos cimentos mais presentes no depósito .....	65
6.	CONCLUSÃO.....	72
7.	Contribuições do trabalho .....	74
7.1.	Sugestão para trabalhos futuros .....	75
	REFERÊNCIAS.....	77

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. As várias disciplinas importantes na caracterização de minérios (modificado WILLIAMS e RICHARDSON, 2004).....	7
Figura 2. Localização Geográfica de Catalão GO (IMB, 2018).....	13
Figura 3. Províncias Alcalinas da região centro-sul do Brasil (Navarro et. Al., 2014).....	14
Figura 4. Modelo do Perfil de Intemperismo de Catalão I (RIBEIRO, 2008).....	20
Figura 5. Expectativa de consumo em Milhões de tonelada/Ano dos nutrientes Globais: N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O (FAO, 2018).....	23
Figura 6. Fatia regional e sub-regional mundial da expectativa de crescimento de consumo de fertilizante fosfatado de 2014 a 2018 (FAO, 2018).....	24
Figura 7. Modelo da estrutura da fluorapatita, em corte perpendicular ao eixo c, segundo o programa Atoms for Windows, versão 3.2 (DOWLY, 1995), destacando os átomos de F e de Ca, em suas posições Ca1 e Ca2 e os tetraedros de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> . O centro do modelo evidencia o canal ocupado pelo Flúor, neste caso (TOLEDO e PEREIRA, 2001).....	25
Figura 8. Projeção da estrutura hexagonal das apatitas sobre o plano cristalográfico (001), evidenciando os túneis formados por esta estrutura hexagonal (BARROS, 2005).....	26
Figura 9. Fotografia das amostras caracterizadas: a) Cimento de Quartzo com Goethita; b) Cimento de Quartzo com Apatita; c) Cimento de Apatita com Goethita; d) Cimento de Quartzo; e) Cimento de Goethita; f) Cimento de Apatita com Quartzo; g) Cimento de Apatita.....	33
Figura 10. Mapa localização das amostras caracterizadas no estudo.....	33
Figura 11. Procedimento PCT 13.001.05 Copebrás CMOC International/CMOC para testes de flotação de apatita em bancada.....	36
Figura 12. Caracterização mineralógica da amostra pilha 80/2017. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV, imagem global.....	43
Figura 13. Liberação individualizada da apatita nas frações: +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Descarga do moinho Pilha 80/2017 – Fonte: CRTI.....	43
Figura 14. Associação mineralógica da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Descarga do moinho Pilha 80/2017 – Fonte: CRTI.....	44
Figura 15. Grau de exposição da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, 150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Descarga do moinho Pilha 80/2017 – Fonte	

CRTI.....	45
Figura 16. Análise de BWI de Bond, Moinho de Bolas para a amostra pilha 80/2017.....	45
Figura 17. Distribuição em massa e de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra do blend da pilha 80/2017.....	46
Figura 18. Distribuição em massa e de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> por etapa e qualidade do concentrado de apatita obtido no período que a pilha 80/2017 foi processada nas Usinas 47 e 76 do Complexo Copebrás CMOC International.....	47
Figura 19. Caracterização Mineralógica da amostra Cimento de Quartzo. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	48
Figura 20. Liberação individualizada da apatita nas frações: +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Cimento de Quartzo – Fonte: CRTI.....	48
Figura 21. Associação mineralógica da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo – Fonte: CRTI.....	49
Figura 22. Grau de exposição da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, 150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo – Fonte: CRTI.....	50
Figura 23. Análise de BWI de Bond, Moinho de Bolas para a amostra de Cimento de Quartzo.....	50
Figura 24. Distribuição em massa, de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Quartzo.....	52
Figura 25. Caracterização Mineralógica da amostra Cimento de Quartzo com Goethita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	53
Figura 26. Liberação individualizada da apatita nas frações: +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Cimento de Quartzo com Goethita – Fonte: CRTI.....	53
Figura 27. Associação mineralógica da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo com Goethita – Fonte: CRTI.....	54
Figura 28. Grau de exposição da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, 150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo com Goethita – Fonte:	

CRTI.....	55
Figura 29. Análise de BWI de Bond, Moinho de Bolas para a amostra de Cimento de Quartzo com Goethita.....	55
Figura 30. Distribuição em massa, de $P_2O_5$ por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Quartzo com Goethita.....	56
Figura 31. Caracterização Mineralógica da amostra Cimento de Apatita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	57
Figura 32. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas para a amostra de Cimento de Apatita.....	57
Figura 33. Distribuição em massa e de $P_2O_5$ por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Apatita.....	58
Figura 34. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Apatita com Quartzo. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	59
Figura 35. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas para a amostra de Cimento de Apatita com Quartzo.....	59
Figura 36. Distribuição em massa e de $P_2O_5$ por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Apatita com Quartzo.....	60
Figura 37. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Quartzo com Apatita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	60
Figura 38. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas para a amostra de Cimento de Quartzo com apatita.....	61
Figura 39. Distribuição em massa, de $P_2O_5$ por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento Quartzo com Apatita.....	61
Figura 40. Caracterização Mineralógica da amostra Cimento de Apatita com Goethita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	62
Figura 41. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas para a amostra de Cimento de Apatita com Goethita.....	63

Figura 42. Distribuição em massa e de $P_2O_5$ por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Apatita com Goethita.....	63
Figura 43. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Goethita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.....	64
Figura 44. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas para a amostra de Cimento de Goethita.....	64
Figura 45. Distribuição em massa e de $P_2O_5$ por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Goethita.....	65
Figura 46. Mapa da localização dos materiais duros cimentados na mina Chapadão.....	66
Figura 47. Teste de flotação padrão nos Cimentos sem Blends a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de $P_2O_5$ , $Fe_2O_3$ e $SiO_2$ no concentrado final de apatita.....	67
Figura 48. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Quartzo à pilha Referência: a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de $P_2O_5$ , $Fe_2O_3$ e $SiO_2$ no concentrado final de apatita.....	67
Figura 49. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Quartzo com Goethita à pilha Referência: a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de $P_2O_5$ , $Fe_2O_3$ e $SiO_2$ no concentrado final de apatita.....	68
Figura 50. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Apatita à pilha 80/2017 a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de $P_2O_5$ , $Fe_2O_3$ e $SiO_2$ no concentrado final de apatita.....	69
Figura 51. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Apatita com Quartzo à pilha 80/2017 a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de $P_2O_5$ , $Fe_2O_3$ e $SiO_2$ no concentrado final de apatita.....	69
Figura 52. Tendência de alimentação e produção em t/h das usinas antes do workshop.....	74
Figura 53. Tendência de alimentação e produção em t/h das usinas depois do workshop.....	75

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.I. – Identificação, perfil intempérico e cimentação das amostras.....	32
Tabela 4.II. – Reagentes e suas concentrações utilizados nos processos de flotação.....	34
Tabela 5.I. – Resultados de análises de FRX para as amostras pilha 80/2017, demais cimentos existentes no depósito de fosfato e especificação industrial do concentrado final.....	42
Tabela 5.II. – Quadro Geral da caracterização tecnológica.....	71

## RESUMO

Melhorar a produtividade das usinas de beneficiamento de fosfato, atendendo os parâmetros de qualidade necessários às unidades produtivas de fertilizantes é um desafio. A melhor proporção dos materiais geológicos a serem lavrados e homogeneizados é necessária para otimizar produtividade e estabilidade no beneficiamento. O perfil de alteração do depósito da mina Chapadão possui cerca de 100 metros de espessura e é subdividido em três tipos básicos, do topo para a base, coincidindo com intensidade decrescente de intemperismo: minério oxidado, minério micáceo e rocha alterada, em cada porção deste perfil de alteração, principalmente próximo aos contatos entre essas três divisões, encontram-se materiais duros, cimentados pelos minerais apatita, quartzo, goethita, monazita e barita. Neste trabalho os principais cimentos do depósito foram caracterizados aplicando a metodologia conceitual básica de caracterização mineralógica: Os resultados mostraram diferenças do comportamento tecnológico entre as tipologias dos minérios cimentados. Os cimentos de quartzo e de quartzo com goethita demonstraram que contribuem negativamente ao processo de flotação, onde foi detectado impacto negativo para atendimento à qualidade especificada do concentrado de apatita para esses dois tipos de cimento, e para recuperação mássica e metalúrgica para o cimento de quartzo. Os cimentos de apatita e de apatita com quartzo demonstraram resultados positivos no processo de flotação, atingindo recuperações mássicas superiores a 80%, recuperações de  $P_2O_5$  acima de 90% e atendimento à qualidade do concentrado de apatita dentro dos limites especificados. O trabalho também demonstrou que o cimento de quartzo apresenta valor de BWI (Índice de trabalho de Bond) significativamente alto em comparação aos demais, 20,27 kWh/t, classificando esse tipo de cimento negativamente economicamente, visto que o custo para produzir concentrado de apatita a partir dessa fonte é maior, devido ao maior gasto de energia e efeito negativo em eficiência e qualidade observado nos testes de flotação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Apatita, Cimentos, Flotação, Geometalurgia.

**ABSTRACT**

Improving the productivity of the Phosphate Beneficiation Plants, meeting the quality parameters required for Fertilizer Production Units is a challenge. The best proportion of the geological materials to be plowed and homogenized is necessary to optimize productivity and stability in the beneficiation. The change profile of the Chapadão mine deposit is about 100 meters thick and is subdivided into three basic types, from top to bottom, coinciding with decreasing intensity of weathering: oxidized ore, micaceous ore and altered rock in each portion of this profile of alteration, mainly close to the contacts between these three divisions, are hard materials, cemented by minerals apatite, quartz, goethite, monazite and barite. In this work the main deposit cements were characterized applying the basic conceptual methodology of mineralogical characterization: The results showed differences in the technological behavior between the types of cemented ores. The quartz and quartz with goethite cements showed that they contribute negatively to the flotation process, where a negative impact was detected to meet the specified quality of the apatite concentrate for these two types of cement, and for mass and metallurgical recovery for the quartz cement. Apatite and apatite with quartz cements showed positive results in the flotation process, reaching mass recoveries above 80%, recoveries of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> above 90% and compliance with the quality of the apatite concentrate within the specified limits. The work also showed that the quartz cement has a BWI (Bond work Index) value significantly higher than the others, 20,27 kWh/t, classifying this type of cement negatively economically, since the cost to produce apatite concentrate from this source is higher, due to the higher energy expenditure and negative effect on efficiency and quality observed in flotation tests.

**KEYWORDS:** Apatite, Cements, Flotation, Geometallurgy.



## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de fertilizantes e o desenvolvimento dos solos demandam conhecimentos sobre o comportamento de determinados minerais e rochas, pois todos nutrientes, exceto o nitrogênio têm origem mineral (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008). O Brasil, gigante no setor do agronegócio, indústria que mais representa a composição do PIB Brasileiro apresenta como ponto fraco a alta dependência em importações de fertilizantes.

Segundo dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (“ANDA”, 2019) Associação Nacional para Difusão de Adubos, as entregas de fertilizantes ao mercado Brasileiro em Janeiro de 2019 registraram crescimento de 10,6% em relação ao mesmo período em 2018. As importações de fertilizantes intermediários alcançaram no mês de janeiro de 2019 a quantidade de 2.513 mil toneladas, indicando aumento de 40,8% em relação ao mesmo período de 2018. Os estudos realizados pela ANDA indicam um déficit entre a oferta e o consumo, indicando a necessidade do desenvolvimento de novas unidades produtoras, otimização e expansão das unidades existentes e, ainda, a necessidade de importação de concentrado fosfático, para o suprimento das necessidades do mercado consumidor nacional (BARROS, 2005).

Aproximadamente 80% das jazidas de fosfato no Brasil são de origem ígnea, esse tipo de jazida possui exploração econômica complexa. As usinas de concentração desse tipo de minério são altamente influenciadas pela composição e homogeneização do minério que alimenta a planta de concentração, isso porque os minerais de apatita apresentam variadas classificações e especificidades em suas composições que impactam na flotabilidade, seletividade e recuperação do mineral durante o processamento (BARROS; FERREIRA; PERES, 2008).

A concentração de apatita é etapa fundamental do processo de tratamento destinado às unidades produtivas de fertilizantes, que são responsáveis pela transformação da apatita insolúvel em solúvel, garantindo a liberação do fósforo às plantas na forma de fertilizantes. O ácido fosfórico,  $H_3PO_4$ , é o composto químico intermediário na indústria de fertilizantes, a matéria prima para a produção deste composto é basicamente a rocha concentrada na usina de beneficiamento mais o ácido sulfúrico, sendo o ácido fosfórico matéria prima para a fabricação de fosfato de amônio, superfosfato triplo, nutrientes líquidos mistos, nutrientes sólidos mistos de alta pureza e vários tipos de fosfatos nítricos (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

Para obtenção de sucesso na produção de fertilizantes pelas indústrias do setor, especificações sob contaminantes são requeridas sob o concentrado apatítico disponibilizado pelas plantas de beneficiamento, com propósito de garantir atendimento às especificações dos produtos finais quanto à qualidade, atendimento a legislações e impactos no processo produtivo negativos que podem afetar também no custo do produto final, ótica que reforça a necessidade de uma avaliação criteriosa do blend disponibilizado nas pilhas de homogeneização e responsabilidade do impacto deste na estabilidade da cadeia produtiva.

Medidas de otimização do processo de concentração para parâmetros de produtividade e atendimento à qualidade têm conduzido estudos para viabilizar opções e adaptações de processos de tratamento para minérios não privilegiados até então nas rotas de concentração tradicionais, por se tratar de aspectos que podem comprometer a produtividade e também pela dificuldade em alcançar seletividade aceitável em relação aos contaminantes, ocorrentes em rochas de fosfato de depósitos de origem ígnea.

A utilização do minério de apatita inicia-se desde o conhecimento do depósito de minério até a obtenção dos produtos fertilizantes. Assim sendo, é necessário um envolvimento sólido entre conhecimento geológico, conhecimento de mineração e conhecimento de processos químicos. A diferença do enfoque observada em cada área, para um mesmo material, faz com que seja necessário a elaboração de um planejamento em conjunto, na busca de otimização de todo processo produtivo minero-químico.

A busca de tal conhecimento deve envolver caracterização geológica detalhada associada e correlacionada com as características metalúrgicas do minério de apatita. A integração das três áreas conduz em melhores resultados de produtividade e impacta em menor custo operacional global.

Sob a ótica da produtividade, a correlação existente entre a massa alimentada no processo de tratamento de minério e a maior produção de concentrado é linear positiva para a grande maioria dos processos, sendo a variável mais relevante de atuação quando se visa produtividade. Entretanto é uma variável que precisa ser bem avaliada sob o aspecto de potencial de perdas, podendo impactar em menor recuperação do sistema, o que não é desejável, avaliações dos limites de capacidades do circuito como um todo devem sempre ser consideradas, atendimentos a critérios de liberação do mineral e impacto ainda em partículas

mistas também são importantes, pois podem resultar em qualidade inferior de concentrado de apatita e ineficiência no processo produtivo, ampliando perdas.

A taxa de alimentação das usinas de beneficiamento é dependente das condições e capacidades dos equipamentos de compactação e cominuição existentes e para a matéria prima, o caso do minério, entende-se que fatores como dureza e qualidade do minério tem grande influência nesse aspecto.

O presente trabalho é um estudo de caracterização tecnológica dos sete tipos de cimentos encontrados no depósito da mina Chapadão, Copebrás/CMOC International, com objetivo de avaliar as principais características independentes destes cimentos que impactam no processo de cominuição, no processo de flotação, bem como no resultado em qualidade do concentrado de apatita disponibilizado às unidades produtivas de fertilizantes influenciados pelo percentual dos cimentos nos blends de minério alimentados nas usinas de concentração de apatita.

Ao final desse trabalho, espera-se obter uma caracterização completa dos cimentos encontrados no depósito e uma avaliação do impacto em produtividade e qualidade sob o efeito da adição dos cimentos mais presentes no depósito na composição dos blends de minérios.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho foi estudar e compreender o impacto dos materiais cimentados, denominados duros, alimentados nos blends de pilhas de minério. Avaliar característica mineralógicas e tecnológicas individuais, bem como em composição no blend com suas respectivas respostas no processo para os cimentos mais presentes no depósito.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Caracterizar as amostras de cimentos do depósito: as amostras de cimento de apatita, cimento de quartzo, cimento de goethita, cimento de apatita com quartzo, cimento de apatita com goethita, cimento de quartzo com apatita e cimento de quartzo com goethita foram caracterizadas quanto à mineralogia, composição química, aspectos físicos relacionados à dureza como BWI;
- Realizar análise de liberação mineral, MLA, para os blends cimento de quartzo e cimento de quartzo com goethita.
- Caracterizar uma pilha referência alimentada em 2017, a pilha 80 quanto à mineralogia, composição química, aspectos físicos relacionados à dureza como BWI e liberação por MLA;
- Analisar especificamente o comportamento na flotação para a adição percentual dos materiais cimentados ao blend referência, adicionados separadamente para as amostras mais predominantes da reserva: cimento de apatita com quartzo, cimento de apatita, cimento de quartzo com goethita e cimento de quartzo;
- Definir em função dos resultados da caracterização tecnológica a previsibilidade do comportamento individual dos cimentos em recuperação e qualidade do concentrado de apatita obtido, bem como expectativa de desafio nos processos de cominuição.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Estudos de Caracterização de Minérios**

O estudo de caracterização mineralógica dos minerais é um braço importante da geometalurgia, ferramenta que integra a informação geológica mineral, metalúrgica e econômica para maximizar o lucro da operação de mina e minimizar o risco técnico e operacional (SEGURA; GASPAR; BROWN, 2013).

A aplicação da caracterização tecnológica se vincula ao aproveitamento de minérios e se reporta a dois segmentos tecnológicos distintos: à técnica de exploração mineral ou lavra e as técnicas de beneficiamento/processamento ou de adequação para a indústria de transformação e de seu aproveitamento industrial. A caracterização tecnológica para fins de beneficiamento está relacionada à avaliação de parâmetros básicos do depósito mineral relacionado as alternativas tecnológicas de tratamento de minérios (BARROS, 2005).

No Brasil, o termo caracterização tecnológica vem sendo aplicado para denominar estudos de minérios destinados ao beneficiamento, abrangendo tanto o estudo das características do minério como o levantamento de índices tecnológicos. Além dos conceitos básicos de tratamento de minério, o estudo de caracterização se norteia também pelos requisitos das aplicações, que utilizam o produto mineral, na medida que estes definem a qualidade necessária destes insumos, balizando o beneficiamento a ser aplicado, tanto no aspecto técnico como o econômico (BARROS, 2005).

Segundo WILLIAMS e RICHARDSON (2004), a caracterização de minérios é a quantificação de dados físicos nas amostras que representam o corpo de minérios. O sucesso do planejamento de mina requer dados de diferentes disciplinas (geologia, química e mineralogia) ou parâmetros (propriedades físicas, metalúrgicas e medições geotécnicas), isso fica claro na Figura 1 onde os autores relacionam essas disciplinas e propriedades.

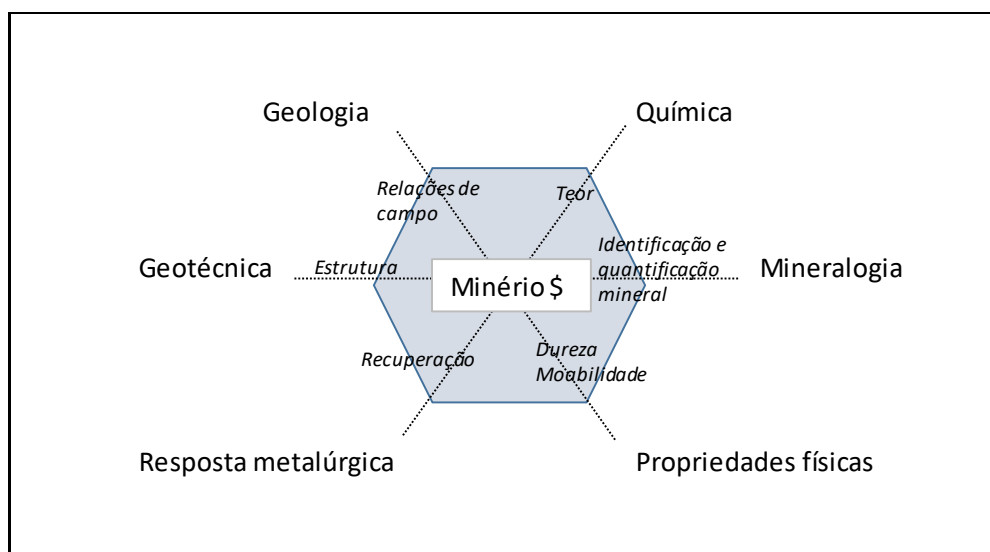


Figura 1. As várias disciplinas importantes na caracterização de minérios (modificado WILLIAMS e RICHARDSON, 2004).

A caracterização mineralógica de um minério determina e quantifica toda a assembleia mineralógica, definem quais são os minerais de interesse e os de ganga. Além disso, estuda as texturas da rocha, definindo o tamanho de partículas necessário para a liberação do(s) minera(is) de interesse dos minerais de ganga, e ainda define diversas propriedades físicas e químicas destes minerais, gerando informações potencialmente úteis na definição das rotas de processamento (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Segundo LUZ, SAMPAIO E FRANÇA (2010) ainda, a caracterização de uma amostra é executada em vários estágios, com forte interdependência entre si, os autores citam como primeiro estágio o fracionamento da amostra, que objetiva facilitar a identificação dos minerais pela sua relativa individualização, melhorar a quantificação das fases e estabelecer certas propriedades dos minerais, incorporando informações úteis para processamento. O fracionamento é, em geral, feito por densidade e susceptibilidade magnética, além de classificação por tamanhos. A resposta dos minerais ao fracionamento já pode fornecer as suas propriedades físicas, inclusive simulando, com as devidas restrições, condições de operação industrial, no segundo estágio é realizada a identificação das fases, que é facilitada na medida em que um ou mais minerais são concentrados no fracionamento, o mineralogista dispõe de uma variada gama de técnicas analíticas para a identificação dos minerais, e as mais difundidas são as microscopias óptica e eletrônica de varredura e a difração de raios X, no terceiro estágio ocorre a quantificação dos minerais, que também pode contar com diversas técnicas de quantificação, no quarto estágio verifica-se a liberação do mineral de interesse em relação aos

de ganga. A eficiência da separação das fases de interesse em relação às de ganga é calculada a partir dos dados das três etapas anteriores, e verificada em diversas faixas de tamanho de partículas, é um dos métodos clássicos de se obter o grau de liberação de um minério, assim como a estimativa de liberação por faixa de tamanho em microscópio óptico. A liberação é uma das informações mais importantes na caracterização.

O conceito de caracterização tecnológica, no entanto, é mais abrangente, pois não se limita às informações químicas e mineralógicas usuais, tais como conteúdo, composições, associações e liberação. Além dessas informações, procura-se determinar o comportamento dos minerais úteis frente ao processo de beneficiamento estipulando índices tecnológicos como, por exemplo, granulometria de liberação, partição de elementos químicos de interesse entre fases distintas, curvas de separabilidade, expectativa de recuperação em massa e metalúrgica, estimativa de qualidade do concentrado, dentre vários outros parâmetros de comportamento no tratamento do minério (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

O presente trabalho caracteriza as amostras de cimento presentes no corpo de minério da Mina Chapadão abordando parâmetros químicos, mineralógicos, bem como dureza (BWI) e comportamento metalúrgico na flotação. A caracterização não cobre toda área da mina para garantir a interpolação confiável dos valores de recuperação, servindo de indicativo da resposta desses materiais no processamento de concentração, mas ainda sendo necessário mais estudos semelhantes de uma composição maior de amostras, de diferentes áreas, litologias e perfis intempéricos dentro do modelo atual de mina para definição de um modelo geometalúrgico.

### **3.1.1. Amostragem**

Quando um determinado volume de material não pode ser manipulado em sua totalidade, é necessária a preparação de um lote representativo. A amostragem correta é fator determinante da qualidade dos resultados a serem gerados em análises e ensaios laboratoriais, de maneira que esses possam representar de maneira adequada certo volume de material do depósito mineral ou serem correlacionáveis aos dados obtidos em um processo industrial (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

A representatividade das amostras coletadas é de fundamental relevância, uma vez que para a realização de ensaios em laboratório são utilizadas massas pequenas que variam desde centenas de gramas até dezenas ou centenas de quilos, sendo importante destacar que, por serem utilizados volumes pequenos de material, em escala descontínua (laboratório), os

procedimentos efetuados apresentam um tempo de resposta relativamente curto, refletindo em maior agilidade na obtenção dos resultados que eventualmente irão subsidiar importantes tomadas de decisões quanto à implantação, manutenção ou modificações das rotinas de processo (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

### **3.1.2. Principais Técnicas Instrumentais de Caracterização da Apatita**

Nesta seção são apresentadas de maneira resumida as principais técnicas empregadas na caracterização tecnológica da apatita:

- Microscopia Óptica (MO):

A técnica de microscopia óptica (MO) por luz transmitida é uma ferramenta básica e importante que permite não apenas identificar as fases de interesse, como também as suas formas de associação com a ganga. A técnica compreende a observação de montagens de partículas minerais, classificadas por fração granulométrica com ou sem separação mineral, montadas em seções polidas, ou em seções delgadas polidas ou não. As observações de fragmentos de rocha são efetuadas previamente à etapa de cominuição da amostra (análise textural). Informações como forma dos cristais, inclusões e recobrimentos superficiais podem ser obtidas através dessa técnica (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):

Através dessa ferramenta é possível se obter um nível de detalhe tanto maior quanto o seu poder de magnificação em relação a MO. Nesta técnica as amostras observadas podem estar na forma de grãos ou partículas coladas a um suporte, ou então, em lâminas delgadas polidas ou ainda, seções polidas. Ao preparar a amostra, se faz necessário o seu recobrimento por uma película condutora (usualmente C, Au, Pt). Podem ser obtidas imagens que destacam diferentes características do material analisado, conforme a necessidade. As imagens geradas com detector de elétrons retroespalhados permitem a distinção entre as espécies minerais pela diferença de número atômico médio dos elementos constituintes, através de tons de cinza. No caso do detector de elétrons secundários, as imagens geradas trazem informações sobre a superfície das partículas do material analisado. Nas imagens obtidas através do detector de catodoluminescência observam-se diferenças devidas a composição de uma mesma partícula de um determinado mineral, variedades de apatita podem ser diferenciadas pelas distintas cores geradas pela catodoluminescência (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).



- Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS):

É um sistema de microanálise química aplicado ao MEV que permite realizar análises químicas pontuais, podendo ser obtidas, de forma estatística, as composições químicas média de cada fase mineral presente, o que é útil para posterior quantificação mineralógica através de cálculos estequiométricos baseados na composição química da amostra.

- Difração de Raios X (DRX):

É um fenômeno no qual os átomos de um cristal, em virtude de seu espaçamento uniforme, causam um padrão de interferência das ondas presentes em um feixe incidente de raios X. A técnica que determina o arranjo dos átomos nos compostos sólidos determina comprimentos e ângulos de ligação. O fenômeno chamado interferência ocorre quando duas ou mais ondas passam através da mesma região do espaço, a interferência é observada como um aumento ou uma diminuição na amplitude total da onda. O fenômeno é uma interferência entre ondas que surge quando há um objeto no seu caminho (ATKINS; JONES, 2012).

- Fluorescência de Raios X (FRX):

Os princípios físicos da fluorescência de Raios X se caracterizam pela indução de transições eletrônicas entre os orbitais mais internos dos átomos utilizando radiações eletromagnéticas de energia adequada (raios X e raios gama). Essas transições podem resultar na emissão de radiações X de energia característica que permitem a identificação da espécie atômica envolvida na transição e a mensuração da sua abundância. Mais especificamente, neste processo a energia da radiação de fluorescência identifica o elemento, enquanto sua intensidade permite que seja medida sua concentração na amostra analisada mediante uma prévia calibragem (FERRETTI; TIRELLO, 2014).

- Testes de Flotação em Bancada e/ou Microflotação:

O teste é referenciado para avaliar a flotabilidade e seletividade da apatita, o objetivo é estimar o comportamento da apatita e da ganga presente na amostra sob flotação, em relação ao pH, ao tipo de coletor, depressores e espécies iônicas presentes na solução. Este teste é conduzido com fases minerais puras sob condições de bancada (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

Os diferentes graus de recobrimento da superfície da apatita por películas de óxido-hidróxidos de ferro podem, não apenas reduzir a área para adsorção do coletor na flotação, como também modificar a susceptibilidade magnética média das partículas. A apatita

fortemente recoberta por estas partículas não responde de maneira adequada ao processo de flotação. O conteúdo de apatita não flotável fortemente impregnada por estas partículas pode ser estimado em ensaio realizado em separadores magnéticos Frantz ou WHIMS (Wet high intensity magnetic separator), procedimento utilizado a longa data para avaliação da recuperação potencial de apatita nos depósitos de fosfato brasileiros (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

○ Determinação de Índice de Trabalho de Bond (Bond Work Index – BWI):

Para produzir concentrados limpos, com baixa contaminação é frequentemente necessário moer o minério em tamanhos finos, a moagem fina aumenta custos, visto que a operação de moagem é a que mais consome energia, representando até 50% do consumo total de energia na operação de beneficiamento. Além do aumento do custo, podem contribuir com o aumento de lamas no processo (WILLS; NAPIER-MUNN, 2007).

A moagem tem o compromisso, assim sendo, entre produzir concentrados limpos (maior teor), custo de operação e perda de material fino, esse balanço é ainda mais importante particularmente, para os minérios de baixo teor. (WILLS; NAPIER-MUNN, 2007).

Provavelmente o parâmetro mais amplamente usado para medir moabilidade é o  $W_i$  de Bond. Bond desenvolveu uma equação que é baseada na teoria que a entrada do trabalho é proporcional ao novo comprimento da partícula produzida na quebra de partículas, e é igual ao trabalho representado pelo produto menos o representado pela alimentação. O work index é o parâmetro de cominuição que expressa a resistência do material para britagem e moagem, numericamente são os quilowatts-hora por tonelada curta necessários para reduzir o material do tamanho da alimentação, teoricamente infinito, para 80% passante em 100 $\mu$ m (WILLS; NAPIER-MUNN, 2007).

Resumindo o texto, a equação abaixo refere-se à equação de Bond:

$$W = \frac{10 \cdot W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10 \cdot W_i}{\sqrt{F}} \quad (\text{Equação de Bond})$$

Onde:

$W_i$  = work index em Kwh/ts;

$P$  = diâmetro em microns em que 80% do produto é passante;

F= diâmetro em microns em que 80% da alimentação é passante;

Austin e Colaboradores (1984) descreveram o procedimento padrão para a realização do ensaio de BWI que será mais amplamente descrito no capítulo 4, Materiais e Métodos deste trabalho, é importante citar que se as características de ruptura de um material permanecerem constantes em todos os intervalos de tamanho, o  $W_i$  calculado deverá permanecer constante, uma vez que expressa a resistência do material à ruptura. No entanto, para a maioria das matérias primas que ocorrem naturalmente, existem diferenças nas características de quebra dependendo do tamanho da partícula, o que pode resultar em variações no índice de trabalho, por exemplo, quando um mineral se rompe facilmente nos limites, mas, os grãos individuais são rígidos a moabilidade aumenta com a finura da moagem. Consequentemente os valores de  $W_i$  são geralmente obtidos para um determinado tamanho de moagem que tipifica a operação de cominuição avaliada (WILLS; NAPIER-MUNN, 2007).

### **3.2. Localização da Área Estudada**

A ocorrência fosfática abordada nesta pesquisa está localizada no Estado de Goiás (GO), na porção sudeste do Estado, a 216 Km da cidade de Goiânia. O Complexo de Catalão I, particularmente no sítio da mineração Ouvidor operado pela empresa Copebrás Ltda. (Grupo CMOC), é acessado pela rodovia GO-210 (HERNÁNDEZ, 2013).

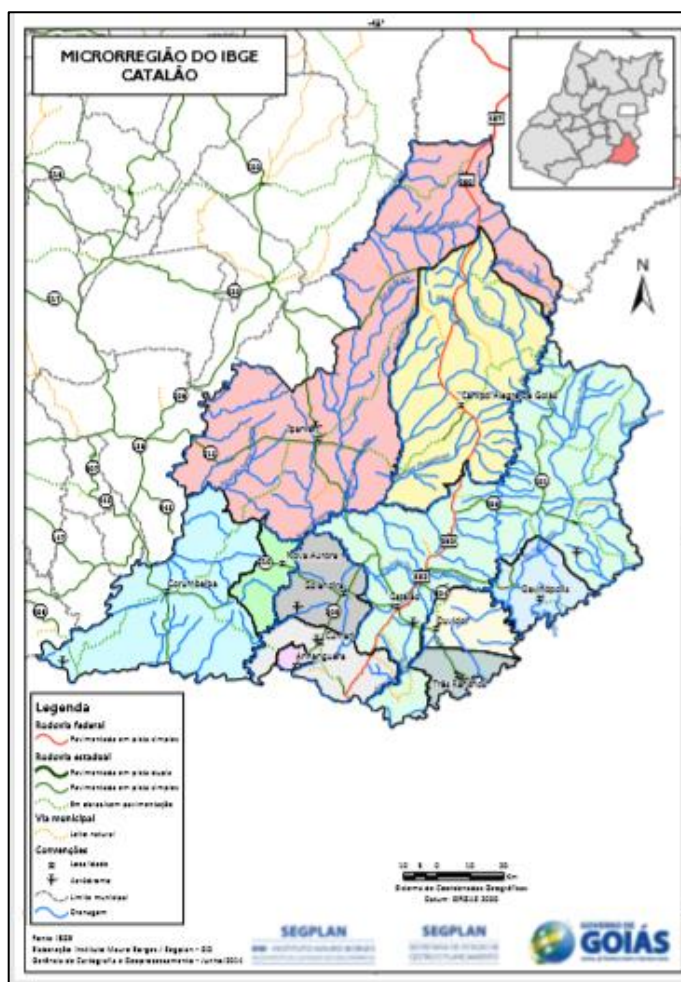


Figura 2. Localização Geográfica de Catalão GO (IMB, 2018).

### 3.3. Contexto Geológico

#### 3.3.1. Geologia Regional

As rochas alcalinas localizadas na região do triângulo mineiro em Minas Gerais e no sudeste do Estado de Goiás, são constituídas por um conjunto de rochas kamafugíticas, kimberlíticas e carbonatíticas que ocorrem sob a forma de diques, pipes, plugs, diatremas, derrames de lavas, depósitos piroclásticos e grandes complexos plutônicos que foram denominados por GIBSON e colaboradores (1995) de Província Ígnea do Alto Paranaíba, APIP. O complexo Catalão I, juntamente com os complexos de Araxá, Catalão II, Salitre I e II e Tapira fazem parte da Província Ígnea do Alto Paranaíba, APIP (IMBERNON, 1993)

Segundo GIBSON e colaboradores (1995) os complexos plutônicos alcalinos contendo carbonatitos fazem parte de um contexto geológico maior associado a um intenso magmatismo ultrapotássico que atingiu a região durante o Cretáceo Superior. A Província Ígnea do Alto

Paranaíba apresenta como limites a parte nordeste da bacia do Paraná e a parte sudeste do cráton São Francisco. Esta faixa relativamente estreita, composta de metamorfitos da Faixa Brasília, que se estabilizou no Proterozóico Superior, comporta as rochas magmáticas desta província de idade Cretácio Superior, estima que a quantidade de magma potássico nessa região, a torna uma das maiores províncias alcalinas intracontinentais do mundo.

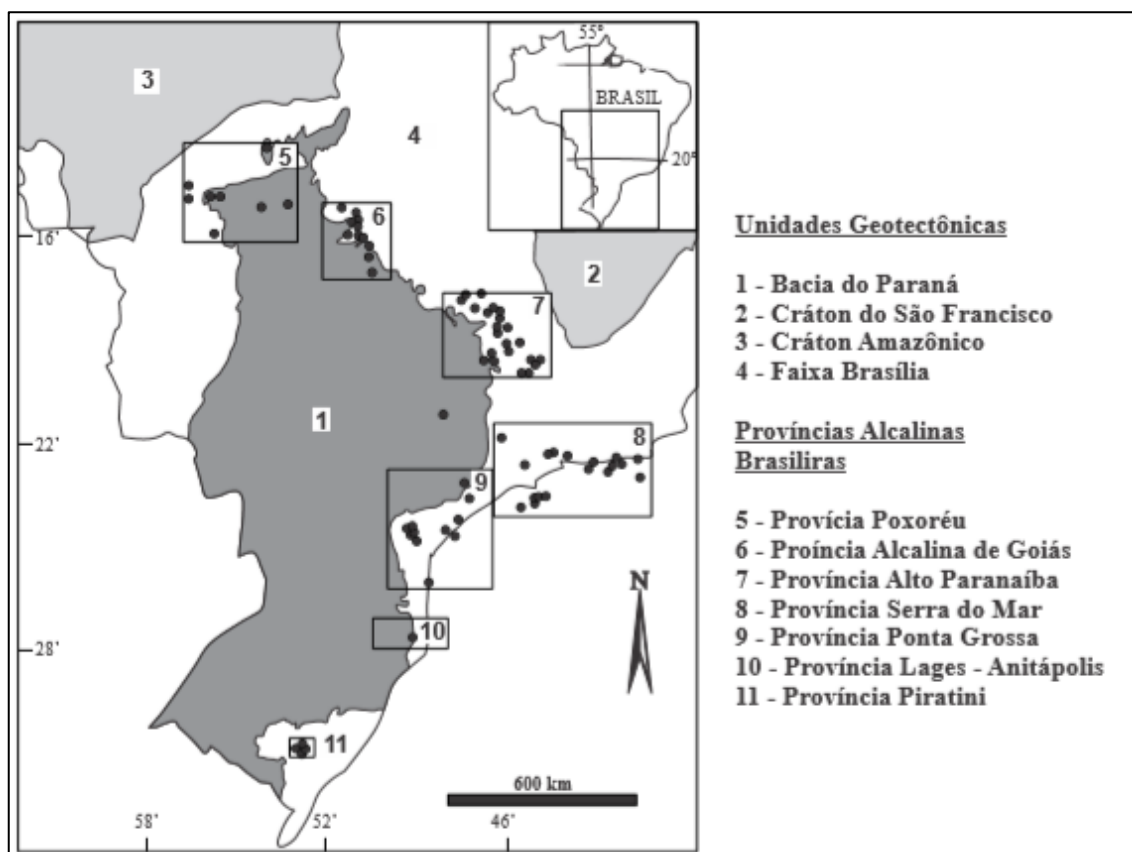


Figura 3. Províncias alcalinas da região centro-sul do Brasil (Navarro et.al., 2014).

Todas as intrusões hipabissais maiores no APIP são caracterizadas por uma mineralogia essencial de olivina, flogopita, perovskita e espinélio +/- diopsídeo. Apatita, ilmenita, Ti-magnetita, monticelita e leucita estão presentes como fases acessórias. A olivina ocorre como macrocristais em todas as intrusões, mas varia consideravelmente em quantidade modal (GIBSON et al., 1995).

Segundo IMBERNON (1993) a feição comum a todos os complexos alcalino-carbonatíticos da Província do Alto Paranaíba é a existência de auréolas de fenitização, em Catalão I, próximo ao contato ígneo, os xistos e os quartzitos encontram-se bastante fenitizados. A intensidade de fenitização diminui de maneira circular e centrífuga, podendo a aureola atingir 2 km de espessura.

As principais unidades litológicas presentes no complexo são as rochas ultramáficas e metassomáticas, rochas carbonatíticas e fenitos (IMBERNON, 1993).

As rochas ultramáficas originais no complexo são dunitos, peridotitos e piroxenitos. Durante a evolução do magmatismo carbonatítico, essas rochas foram submetidas a importantes processos de transformação metassomática originando metafoscoritos. A flogopitização principal resultado desse metassomatismo, desenvolveu-se em todo corpo ígneo com maior intensidade nas regiões periféricas, essas rochas são observadas em larga escala no complexo, intensamente cortadas por veios carbonatíticos (IMBERNON, 1993).

Os glimmeritos são compostos por flogopitas, carbonatos e opacos (ilmenita, magnetita, pirita), ocorrem também apatita, serpentina, clinohumita e titanita. Os carbonatos são principalmente calcita e dolomita (IMBERNON, 1993).

Segundo IMBERNON (1993) as rochas carbonatíticas do complexo ocorrem como veios irregulares, cortando as rochas ultramáficas. Cinco estágios de formação de rochas carbonatíticas sucessivos foram definidos:

- a) A partir da primeira manifestação carbonatítica, ocorreu a cristalização de uma rocha formada por calcita intercrescida com magnetita, apatita, flogopita e olivina, de granulação fina e homogênea, estágio denominado foscorito;
- b) No segundo estágio magmático foram geradas rochas de magnetita, flogopita, apatita, pirocloro e calcita. As rochas desse estágio apresentam elevadas concentrações de apatita e pirocloro, além de U, Th e ETR;
- c) O primeiro magma carbonatítico mais rico em carbonatos (calcita) gerou sovitos e silicosovitos na forma de diques e veios, as rochas desse estágio são compostas por carbonato, flogopita, apatita, magnetita, ilmenita, pirita, pirocloro e perovskita;
- d) Os alvikitos e berfositos criptocristalinos gerados no quarto estágio apresentam estruturas bandadas de fluxo. Estão associados à atividade pneumatólica-hidrotermal tardia, evidenciada pela formação de cocardes em bandas milimétricas alternadas com calcedônia, carbonatos e barita criptocristalinos;
- e) O último estágio de evolução dos carbonatitos é representado por veios tardios cristalizados a partir de provável líquido de fusão residual do magma carbonatítico. A granulometria da rocha é muito fina e calcita é o carbonato predominante,

ocorrendo subordinadamente, dolomita, barita e sulfetos (pirita e pirrotita). Silicificação hidrotermal e cloritização são observadas. Os veios deste estágio interceptam todos os demais estágios, indicando que são as rochas mais jovens do complexo.

Os fenitos circundam todo o complexo, formando uma auréola de fenitização que é resultante da reação entre as soluções de origem ígnea, ricas em álcalis e alumina, e as encaixantes. Fenômenos de feldspatização, nefelinização e aegerinização originados dessa intensa atividade metassomática produziram estruturas como brechação e pegmatização, comuns nesse tipo de complexo (IMBERNON, 1993).

### **3.3.2. Geologia do Complexo Catalão I**

O Complexo de Catalão I é constituído morfologicamente em um platô de forma sub-circular com seus eixos N-S e E-W medindo respectivamente 6,0 e 5,5 km destaca-se na paisagem formando um “chapadão” de altitude média de 900m, com um desnível de 100m em relação às rochas encaixantes (IMBERNON, 1993).

Segundo SEGUIN (2015) a jazida mineral que constitui a Mina de fosfato é resultante da concentração supergênica de apatita durante o intemperismo de rochas ultramáficas alcalinas flogopitizadas, intrudidas pelas rochas das séries foscorítica e carbonatítica.

No perfil de alteração que se estabeleceu nessas rochas ocorrem subdivisões relacionadas com o grau de intemperismo, e em cada porção distinta do perfil encontram-se materiais de alta resistência, denominados genericamente de Materiais Duros (SEGUIN, 2015).

#### **3.3.2.1. Tipos Petrográficos e Litotipos do Complexo Catalão I**

RIBEIRO (2008) dividiu as rochas do Complexo Catalão I da seguinte forma:

- **Rochas da Série Bebedourítica:**
- ✓ **Piroxenitos e dunitos:**

Ocorrem de forma aleatória na borda do domo. Os piroxenitos preservados, apesar de raros foram identificados a partir do núcleo centimétrico preservado no interior dos flogopitos. As rochas desse grupo possuem composição ultramáfica, predominando a serpentina, derivada

da olivina e/ou do piroxênio. Dois grupos de serpentinito foram identificados no estudo de RIBEIRO, em 2008, sobre o Complexo Catalão I, um que tem como característica principal a presença dos minerais de titânio, como o anatásio e a perovskita acompanhados de magnetita e o outro rico em apatita, porém sem a presença de perovskita e anatásio. Nos dois grupos, a serpentina apresenta-se normalmente na cor cinza esverdeada e em alguns momentos avermelhada, denunciando presença de óxidos de ferro.

✓ **Flogopititos magmáticos:**

O conjunto de flogopititos magmáticos e metassomáticos são as rochas mais abundantes no Complexo Catalão I, ocorrem com maior frequência na borda do domo, superando 90% das rochas ali presentes. Apresentam-se normalmente nas cores castanho avermelhado, quando de origem metassomática, e preta ou cinza escuro quando de origem magmática (RIBEIRO, 2008).

Em Catalão I é observado que os flogopititos derivados do metassomatismo de rochas ultramáficas por processos metassomáticos apresentam-se potencialmente mineralizados em apatita. Por outro lado, os flogopititos magmáticos, com raras exceções, não demonstram a mesma potencialidade, apesar da apatita estar sempre presente, ela ocorre em quantidades subordinadas, ressaltando que aparentemente, alguns flogopititos magmáticos mineralizados em apatita, o são as custas da injeção de veios de apatitito e foscorito, que ocorrem em todo complexo (RIBEIRO, 2008).

✓ **Brechas magmáticas:**

A ocorrência de Brechas se multiplica por todo o domo, tanto nos afloramentos quanto nos testemunhos de sondagens. São rochas caracterizadas como um evento tardio do complexo. A característica principal é a matriz flogopítica ou às vezes carbonatítica sustentando xenólitos de diversas composições incluindo carbonatito, foscorito, piroxenito, flogopitito e dunito (RIBEIRO, 2008).

➤ **Rochas da Série Foscorítica:**

O foscorito é uma rocha ígnea composta por magnetita, olivina e apatita, normalmente associada com carbonatitos (RIBEIRO, 2008).

O grupo denominado foscorítico consiste de rochas compostas por olivina e/ou pseudomorfos da olivina flogopitizadas, flogopita, apatita e magnetita. Estão presentes por toda



a área, mais consistentemente na parte central do domo, entre a zona carbonatítica que denomina o centro e a zona de predominância ultramáfica nas bordas do domo. Consequentemente ocorre um aumento de apatita e magnetita da borda para o centro do complexo. Os foscoritos ocorrem em veios, diques, pequenos bolsões e plugs cortando diversos tipos de rochas desde as silicáticas até as carbonatíticas (RIBEIRO, 2008).

A série foscorítica se faz importante tanto do ponto de vista petrológico quanto do ponto de vista econômico, essas rochas são responsáveis em grande parte pelas duas jazidas em exploração em Catalão: nióbio e fosfatos (RIBEIRO, 2008).

A apatita, a flogopita e a magnetita, cuja distribuição abrange todos os foscoritos, apresentam-se distribuídas em duas populações distintas e isso pode significar gêneses diferentes. Os foscoritos situados na Fosfértil e na Copebrás são desprovidos de pirocloro, os foscoritos da Mineração Catalão apresentam pirocloro.

Sendo os foscoritos susceptíveis aos mesmos processos petrológicos provavelmente devem apresentar assinaturas semelhantes, em Catalão os foscoritos estão intimamente associados com flogopititos e piroxenitos aparentam-se na forma de bolsões irregulares associados a uma evolução do magma ultramáfico rico em apatita. Sendo os foscoritos ricos em pirocloro associados a carbonatitos dolomíticos (RIBEIRO, 2008).

➤ **Rochas da série Carbonatítica:**

As rochas da série carbonatítica ocorrem distribuídas por todo o domo, na forma de pequenos veios até diques que formam um intricado emaranhado de rochas de diversas composições. No entanto esses veios e diques apresentam extrema variação entre o centro e as bordas do domo. Enquanto na parte central os veios, diques e plugs carbonatíticos são as rochas dominantes, nas bordas os flogopititos predominam sendo os carbonatitos restritos a finos e escassos veios (RIBEIRO, 2008).

O complexo pode ser dividido em três grandes unidades segundo RIBEIRO (2008):

- 1) A parte central onde predominam os carbonatitos e foscoritos sobre as rochas silicáticas;
- 2) A parte intermediária onde carbonatitos e foscoritos se equivalem em proporção às rochas silicáticas;

- 3) A região da borda onde predominam as rochas de filiação silicática sobre carbonatitos e foscóricos.

Os carbonatitos tem como característica importante suas variações químicas e mineralógicas e os eventos associados a estes. Quimicamente, os carbonatitos da região podem variar de Ca-Carbonatitos a Mg-Carbonatitos, os grandes volumes de carbonatito presente no complexo são sempre dolomita carbonatitos, sendo que os Ca-Carbonatitos ocorrem com maior frequência como glóbulos aglutinados de calcita formando bolsões carbonatíticos que alimentam veios e diques espalhados por todo o complexo (RIBEIRO, 2008).

➤ **Rochas de transformação Carbo-hidrotermal:**

Além dos carbonatitos calcíticos/dolomíticos de ampla ocorrência por todo o complexo existe um outro grupo de carbonatito cuja a principal característica é a grande quantidade de Magnesita que adicionada a dolomita presente eleva o teor de MgO consideravelmente, para valores superiores a 40%, para diferenciá-lo dos carbonatitos dolomíticos, o autor propõe denominá-lo de carbonatito dolomítico/magnesítico, esses ocorrem na forma de veios e diques em piroxenitos e flogopititos, tendo como constituintes essenciais dolomita, magnesita, monazita, pirita, serpentina e ankerita (RIBEIRO, 2008).

O termo hidrotermalismo tem o mesmo sentido de metassomatismo, que é uma alteração na composição química da rocha por adição ou remoção de material pela ação dos fluidos carbo-hidrotermais. Nesse grupo as rochas são modificadas por fluidos carbo-hidrotermais derivados da intrusão carbonatítica. Neste caso, se os protolitos são da série bebedourítica, resultam em flogopitíticos metassomáticos com perovskita e flogopititos metassomáticos ricos em apatita e flogopititos metassomáticos entremeados por veios de monazita. Se os protolitos são derivados da série foscórica resultam em foscóricos metassomáticos ricos em monazita e monazititos. Se os protolitos são derivados de dolomita carbonatito a rocha resultante é a dolomita carbonatito magnesítica (RIBEIRO, 2008).

➤ **Veios de Origem Carbo-hidrotermal:**

RIBEIRO (2008) abordou algumas rochas que ocorrem em pequenos veios presumidamente derivadas diretamente de processos hidrotermais.

Nos veios de origem Carbo-hidrotermal a monazita apresenta-se ora substituindo minerais pré-existentes, ora como veios cortando vários litotipos. Na região do córrego do

Garimpo, Lagoa Seca sul e Lagoa Seca norte é marcante a presença de veios diques associados à barita e monazita, ou barita, monazita e apatita (RIBEIRO, 2008).

### 3.3.2.2. Perfil Intempérico do Complexo Catalão I

No trabalho de RIBEIRO (2008) o perfil de intemperismo da mina foi definido em cinco níveis da base para o topo:

- Rochas Frescas: compostas por foscritos e flogopititos, cortados por inúmeros veios carbonatíficos;
- Rocha Alterada: onde todas as estruturas das rochas frescas são preservadas;
- Saproilito Isalterítico: horizonte com cerca de 25m de espessura onde a estrutura e textura da rocha pré-existente são preservadas;
- Saproilito Aloterítico: decorrente da evolução do saproilito isalterítico, sua espessura atinge os 25m, é um nível mais homogêneo composto de material argilo-arenoso solto, amarelo avermelhado, onde as estruturas originais não podem mais ser identificadas;
- Capeando o depósito, uma cobertura alóctone, ou cobertura superficial de cores vermelho a rosada é o que se impõe.

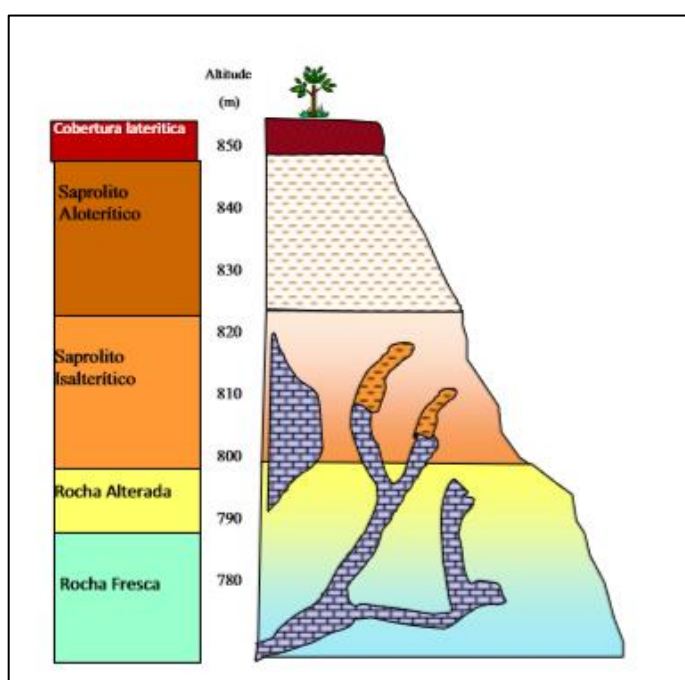


Figura 4. Modelo do Perfil de Intemperismo de Catalão I (RIBEIRO, 2008).

IMBERNOM (1993) destaca ainda que o processo de laterização ocorrido no Complexo de Catalão I desenvolveu um perfil intempérico com horizontes bem definidos. Segundo BARROS DE OLIVEIRA E LIGORI IMBERNON (1998) no perfil Saprolito Isalterítico é onde os depósitos econômicos de apatita se encontram, contendo alto teor de  $P_2O_5$  e CaO e baixo teor de  $SiO_2$  e MgO, sendo o mineral predominante neste horizonte a apatita, junto com goethita, quartzo e pequenas quantidades de fosfatos aluminosos hidratados. No horizonte saprolito aloterítico a composição mineralógica consiste de goethita, fosfatos aluminosos e quartzo, sendo os menores constituintes o anatásio, magnetita, barita, hematita e óxidos de Mn; esses perfis, quimicamente, apresentam alto teor de  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$ .

Em Catalão I, os horizontes mineralizados em que a apatita primária preserva suas características representam a maior parte do minério, por outro lado, os minérios que apresentam problemas na usina de concentração são os que contêm apatita modificada (morfológica e química) ou onde houve a formação de fosfatos supérgenos (apatíticos e aluminosos). Nestes casos, apesar das características químicas verificadas serem próximas do normal ( $P_2O_5$  e  $CaO/P_2O_5$ ), estudos micromorfológicos e microgeoquímicos evidenciaram composições, morfologias e texturas que prenunciam um comportamento muito diferente da apatita original durante os processos industriais de concentração e beneficiamento (TOLEDO, M.C.M.; PEREIRA, 2001).

### **3.4. Fosfato**

O fósforo é um elemento fundamental na geração e armazenamento de energia das plantas, através da fotossíntese, e dos animais, presente nas células sob a forma de trifosfato de adenosina – ATP (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010). O elemento existe em abundância na natureza e seus minérios são rochas naturais que se formam em ambientes geológicos variados. Habitualmente, contêm mais de um tipo de fosfato, sendo os mais comuns os fosfatos de cálcio do grupo apatita. Quando em quantidade e concentração suficientes, formam depósitos economicamente viáveis. Estes minérios podem então ser utilizados na manufatura de produtos comerciais, sendo a principal aplicação na agricultura, como fertilizante (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

Da mina até os produtos industriais (ácido fosfórico e seus derivados) e aos campos de cultivo (fertilizantes), o fósforo segue vários caminhos em função da tipologia do minério, da distribuição geográfica das jazidas e centros de consumo, das substâncias fabricadas, das

características do parque industrial e da recuperação de subprodutos com valor comercial a que se associa e redução/eliminação de agentes causadores de impactos ambientais (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

A composição das rochas de fosfato varia de um depósito para o outro, de forma que se espera um comportamento diferente dependendo da origem das rochas e composição dos blends alimentados nos processos de beneficiamento e acidulação. As rochas de fosfato são compostas do grupo de apatita em associação com uma assembleia de diferentes minerais acessórios como fluoretos, carbonatos, argilas, quartzos, silicatos e óxidos metálicos. A flotação é a técnica mais amplamente usada para separar a apatita da ganga presente na polpa, as ineficiências nesse processo traduzem perdas significativas que impactam no valor econômico das reservas como um todo (SANTANA et al., 2008).

O ciclo de suprimento do fósforo inicia-se nos fosfatos naturais (a apatita é o principal), passa para o solo por solubilização, continua-se ao ser absorvido pelas plantas, entra na vida animal pela alimentação dos herbívoros e onívoros, havendo forte decaimento no seu retorno normal ao solo. Se a vegetação, natural ou de cultura, for constantemente removida (plantio-colheitas), é necessário compensar a perda de fósforo e outros oligo-elementos pela aplicação de fertilizantes (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

O fósforo um dos três macronutrientes principais, juntamente com o nitrogênio e o potássio é elemento fundamental no processo de conversão da energia solar em alimento, fibra e óleo pelas plantas. “Desempenha função chave na fotossíntese, no metabolismo de açúcares, no armazenamento e transferência de energia, na divisão celular, no alargamento das células e na transferência da informação genética” (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

Devido à atividade o fósforo não é encontrado livre na natureza, apresentando-se na forma de seus compostos, sais, denominados fosfatados, sendo o magma uma fonte primária do fósforo. Esse elemento cristaliza-se na forma do mineral apatita, durante a diferenciação magmática, que mostra que o teor de fósforo nas rochas ígneas diminui com aumento da acidez da rocha, tornando-se fator decisivo para a concentração e aproveitamento deste mineral (BARROS, 2005).

A principal utilização da rocha fosfática é na produção de fertilizantes para emprego na agroindústria, além da fabricação de suplementos para nutrição industrial. A quantidade de solo agricultável no planeta é bastante restrita e a atividade agrícola acaba por extrair os nutrientes

do solo num ritmo mais acelerado do que o naturalmente sustentável. Dessa maneira, para que se possa atender a demanda crescente de alimentos para a população mundial, os fertilizantes são indispensáveis à agricultura, já que constituem a única forma de devolução dos principais nutrientes para o solo (ULIANA; KAHN; BRAZ, 2010).

Segundo FAO (2018) à luz do contexto em relação a demanda crescente de alimentos para a população mundial e tendo em vista os fatores que influenciarão e provavelmente impactarão no futuro, a demanda por nutrientes fertilizantes foi projetada com expectativa de crescimento sucessivo de 1,8% ao ano no total de consumo de nutrientes fertilizantes (N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O). A Figura 5 indica as previsões da demanda mundial de nutrientes totais de fertilizantes de 2014 a 2018, contra o consumo real nos seis anos anteriores.

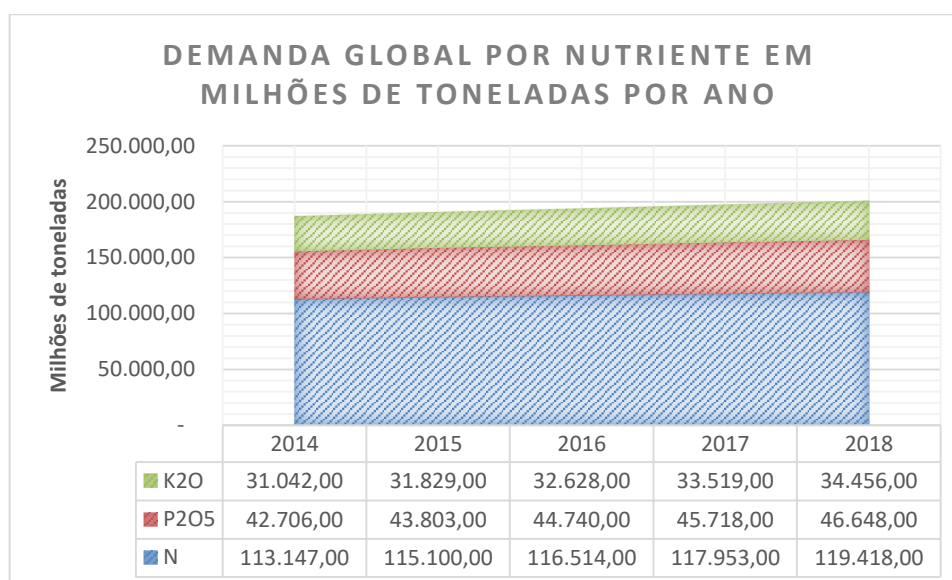


Figura 5. Expectativa de consumo em Milhões de tonelada/Ano dos nutrientes Globais: N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O (FAO, 2018).

A demanda de fertilizantes de fosfato inclui P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em superfosfato simples, aplicação direta de rocha fosfática, fertilizantes à base de ácido nítrico, etc. A demanda mundial de fertilizantes fosfatados aumentou de 41.700.000 toneladas em 2013 para 42.700.000 toneladas em 2014, uma taxa de crescimento de 2,4%. Espera-se que atinja 46.600.000 toneladas em 2018, com uma taxa de crescimento de 2,2% ao ano. Do aumento global da procura de 3.900.000 toneladas P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> entre 2014 e 2018, 58% seriam na Ásia, 29% na América, 9% na Europa, 4% na África e 0,5% na Oceania. Entre os países asiáticos, cerca de 27% do crescimento da demanda mundial de fosfato é esperado na Índia, 10% na China, 5% na Indonésia, 3% no Paquistão e 2% no Bangladesh. A Ásia Ocidental é responsável por 7% do aumento do consumo, do qual o Irã tem a maior parte do aumento. Entre os principais países das Américas, prevê-se que 19% do

crescimento da demanda mundial seja no Brasil, 4% na Argentina e 2% nos EUA. Espera-se que a fatia da Europa do Leste e da Ásia Central seja de 6%, dos quais a Rússia representa uma participação de 2% e a Ucrânia de aproximadamente 2%. A Europa Ocidental tem um nível de consumo previsto e estável, e a Europa Central deve contribuir com 3% do aumento mundial do consumo. A participação do aumento na Oceania deve ser de 0,5 por cento. Na África Subsaariana, o aumento é provavelmente de 2% e no norte da África, também é esperado que seja em torno de 2%. A Figura 6 mostra as parcelas regionais e sub-regionais do aumento mundial do consumo de fosfato entre 2014 e 2018 (FAO, 2018).

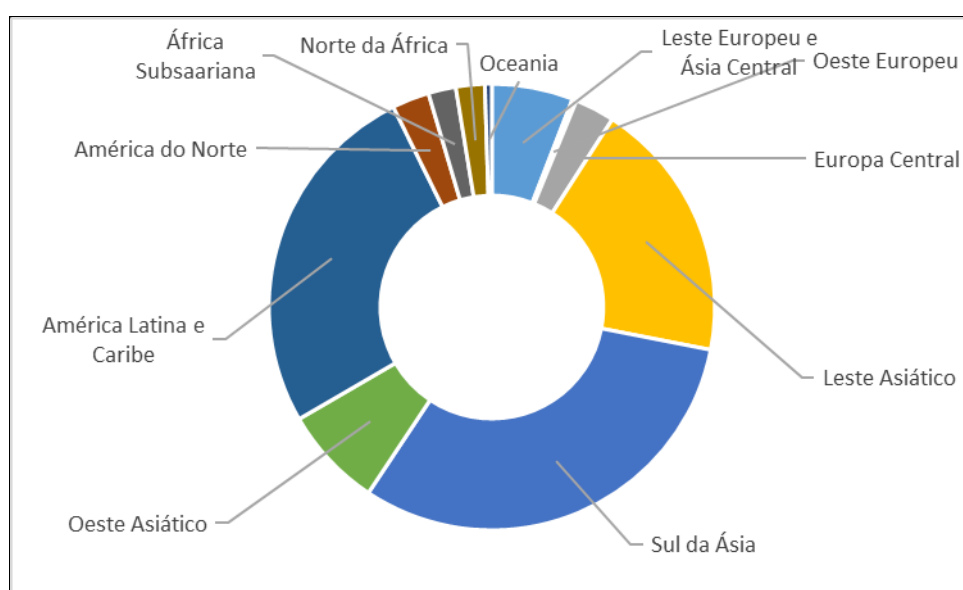


Figura 6. Fatia regional e sub-regional mundial da expectativa de crescimento de consumo de fertilizante fosfatado de 2014 a 2018 (FAO, 2018).

O principal portador de fósforo dos minérios brasileiros é a apatita, cujos processos de concentração continuam a ser de importância essencial no beneficiamento mineral, os quais influenciam, de forma decisiva, a rentabilidade e a viabilidade econômica do empreendimento mineral. Considerando-se a competição cada vez mais acirrada nos mercados, o produtor de fosfato necessita buscar conhecimentos científicos e tecnológicos de ponta para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças nos paradigmas da economia (SILVA, 2005).

#### 3.4.1. Apatita

Embora o fósforo esteja presente em numerosos minerais, apenas os da série apatita constituem minerais de minério. As variedades fluorapatita  $[Ca_5(PO_4,CO_3,OH)_3(F,OH)]$ , a

hidroxiapatita  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F})]$  e, mais raramente, a cloroapatita  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl},\text{OH})]$  ocorrem nas rochas de origem ígnea, principalmente em carbonatitos. Já na maioria dos depósitos sedimentares predominam as variedades de carbonatoapatita  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4,\text{CO}_3)_3(\text{OH},\text{F})]$  e carbonato-fluorapatita  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4,\text{CO}_3)_3(\text{F},\text{OH})]$  (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

O mineral de apatita mais geralmente citado como o mais frequente associado aos carbonatitos e como acessório nas rochas ígneas em geral, é a fluorapatita (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

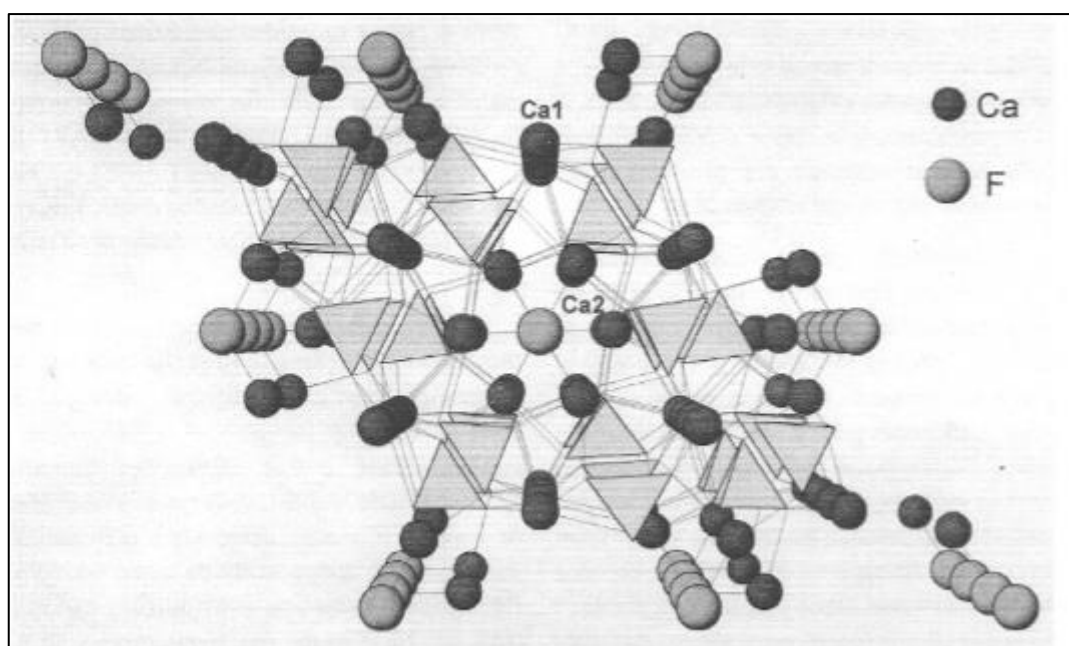


Figura 7. Modelo da estrutura da fluorapatita, em corte perpendicular ao eixo c, segundo o programa Atoms for Windows, versão 3.2 (DOWLY, 1995), destacando os átomos de F e de Ca, em suas posições Ca1 e Ca2 e os tetraedros de  $\text{PO}_4^{-3}$ . O centro do modelo evidencia o canal ocupado pelo Flúor, neste caso (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

As substituições dos íons na estrutura cristalina do mineral, ocorrem de forma natural com facilidade expressiva, sendo consideradas como regra e não exceção. Além da variação da composição química das apatitas estar associada às substituições dos cátions e ânions em sua rede cristalina, o meio no qual elas são formadas (ambiente magmático, pós-magmático, tardio ou hidrotermal e supergênico) também contribui como um fator a ser levado em consideração (GONTIJO; SANTOS, 2017).

A estrutura cristalina dos minerais do grupo dos fosfatos possui fórmula geral  $A_{10}(\text{XO}_4)_6\text{Z}_2$ . Nessa representação, sítios A, X e Z são, principalmente (BARROS, 2005; GONTIJO e SANTOS, 2017) os apresentados abaixo, dessa forma indicando que existe uma grande possibilidade de substituições na estrutura cristalina do mineral, e somada à diversidade dos



ambientes de formação, a composição química e as propriedades de superfície variam bastante de um depósito para outro.

- (i) A: Ca, Pb, Sr, Zn, Na, Be, Cd, ETR, Sc, Mg e Mn;
- (ii) X: P, As, V, S, C, Si e Cr;
- (iii) Z: F, OH, Cl e Br.

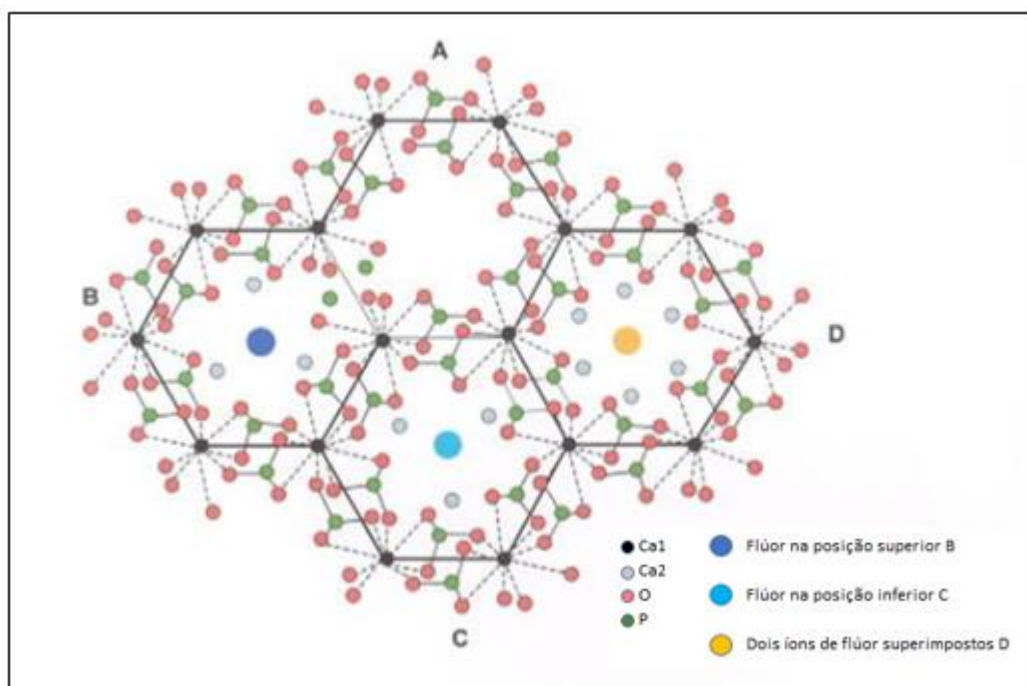


Figura 8. Projeção da estrutura hexagonal das apatitas sobre o plano cristalográfico (001), evidenciando os túneis formados por esta estrutura hexagonal (BARROS, 2005).

Os minérios fosfáticos lateríticos brasileiros contêm diversos tipos morfológicos de apatita, formados durante toda a evolução dos complexos ígneos, a partir de apatita ígnea herdada de rocha fresca. (TOLEDO, 2018) enfatizou em seu trabalho as propriedades da apatita presentes no complexo alcalino-carbonatítico de Catalão 1 que determinam quão bem ou quão mal a apatita pode ser recuperada industrialmente. Outro aspecto dessa variabilidade indica necessidade de diferenciar a procedência da apatita utilizada para o processamento de fertilizantes, visto que diferenças geoquímicas e cristaloquímicas iniciais podem resultar em produtos com características distintas de solubilidade (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

A apatita pode ser classificada em primária (origem magmática) e secundária (origem hidrotermal), simplificada: as apatitas primárias são limpas e as apatitas secundárias contêm em sua superfície inclusões e revestimentos principalmente de óxidos e hidróxidos de

ferro, bem como de óxidos de magnésio. Os autores BARROS, FERREIRA E PERES (2018) sugeriram uma classificação dos três maiores tipos presentes no depósito de salitre:

- Apatitas primárias (alto conteúdo de  $\text{SiO}_2$ ). As apatitas primárias ou magmáticas caracterizam-se por apresentarem formas granulares, ovóides e arredondadas, variando de vítreas a translúcidas, com hábito prismático, com inclusões e estrias de dissolução. Essas apatitas estão presentes nas rochas inalteradas, ocorrendo, também, no manto de intemperismo (BARROS, 2005).
- Apatitas secundárias (alto conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e de óxidos de magnésio). Podem ser classificadas em apatitas prismáticas hexagonais radiais, microcristalinas e criptocristalinas. As apatitas prismáticas hexagonais formam agregados com uma estrutura em “leque”. As apatitas microcristalinas ocorrem em agregados semi-esféricos com aspecto “rugoso”, formados a partir do crescimento concêntrico de microprismas. Já, as apatitas criptocristalinas apresentam um aspecto “nebuloso”, em alguns casos formando estrias, podendo ocorrer associadas a óxido e hidróxido de ferro. A origem dessas apatitas se caracteriza por processos posteriores de recristalização e reprecipitação, considerados supérgenos. Em termos morfológicos, esse tipo possui uma baixa cristalinidade, associada com intercrescimento e recobrimento por óxi-hidróxidos de ferro (BARROS, 2005; LENHARO, 1994).

Finalmente é necessário considerar que a apatita, como único mineral de minério fosfático, amplamente utilizado na produção de alimentos deve ter sua composição e seu comportamento controlados em todas as etapas de utilização, já que pode fornecer elementos químicos considerado prejudiciais ao ambiente e à saúde animal e humana. Alguns países já controlam a qualidade da rocha fosfática para sua utilização industrial, em termos de teores em Cd, U, Th e Pb, principalmente, o que só acontece em alguns casos no Brasil. Assim, o conhecimento preciso da química dos elementos tóxicos dentro da estrutura apatítica é necessário para auxiliar o desenvolvimento de técnicas de extração destes elementos antes que eles entrem na cadeia alimentar (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

### 3.5. Processamento mineral da Apatita

A indústria de fosfato brasileira tem ampla experiência e tradição com minérios de fosfato oxidados de origem ígnea. Os fluxogramas típicos das operações de concentração de fosfato no Brasil envolvem: britagem, moagem e classificação em hidrociclones, separação magnética de baixa intensidade, deslamagem para remoção de partículas menores que  $10\mu\text{m}$ , flotação de barita e de apatita, seguida de separação magnética de alta intensidade. As células de flotação usadas nos circuitos, geralmente são células mecânicas ( $d_{50}\approx 70\mu\text{m}$ ) e colunas de flotação para frações finas ( $d_{50}\approx 20\mu\text{m}$ ). Os reagentes utilizados na flotação de apatitas são: ácidos carboxílicos saponificados com NaOH, como coletores; amido de milho, como depressores e hidróxido de sódio para controle de pH (MATIOLLO et al., 2017).

#### 3.5.1. Liberação de Partícula

Em se tratando de liberação, em tratamento de minérios existem duas propriedades básicas das populações de partículas que definem seu comportamento, na maioria dos processos: tamanho e composição (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Na maioria dos minérios, várias fases estarão presentes, e pelo menos uma fase terá valor econômico e, pelo menos, uma outra fase constituirá ganga. Qualquer cálculo metalúrgico envolvendo partículas distribuídas está relacionado ao problema de liberação, e processos só podem ser descritos acuradamente quando o espectro de liberação é conhecido (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Na maioria dos casos o tamanho máximo das partículas é fixado pela liberação dos grãos do mineral cuja recuperação é o objetivo do tratamento. Quando a granulometria de liberação é maior que aquela que possibilita o transporte das partículas pelas bolhas de ar, esse fator passa a governar o tamanho máximo na alimentação. O limite inferior da faixa granulométrica está relacionado com o conceito de lamas, tradicionalmente as lamas são prejudiciais na maioria dos sistemas de flotação. Na prática, a deslamagem não é feita necessariamente em  $10\mu\text{m}$ , o tamanho de corte é definido em função do consumo exagerado de reagentes e da perda de seletividade no processo. Um fenômeno comum é o recobrimento da superfície do mineral por lamas de outro(s), conhecido como “slimes coating”, que pode chegar a inibir completamente a seletividade na flotação. Na flotação, assim como em outros processos que envolvem a partição

de fluxo de polpas, partículas menores que um certo tamanho crítico acompanham a partição de água (CHAVES, 2009).

As definições sobre a necessidade de deslamagem e granulometria de corte devem levar em conta dois fatores conflitantes: os custos de operação e as perdas em mineral útil confrontados com o menor consumo de reagentes e uma maior seletividade (CHAVES, 2009).

No processamento mineral a redução do tamanho de partícula ocorre através das operações de britagem e moagem, com objetivo de liberar os minerais de interesse da ganga para atender as necessidades de mercado. Os processos de cominuição e os processos de flotação estão fortemente conectados, visto que a moagem libera os grãos minerais, enquanto a flotação os separa em minerais concentrados e rejeitos (SANTANA et al., 2008).

### **3.5.2. Flotação de Apatita**

Segundo ZHANG, MILLER, El-SHALL em 2012, as características do minério de fosfato determinam a técnica de processamento a ser utilizada, já que minerais de fosfato são altamente dispersos e variáveis, além de ter natureza similar à ganga, eles são difíceis de beneficiar e requerem passos complicados e específicos. Dentre as características de processamento elencadas pelos autores, destacam-se:

- A flotação como método dominante para beneficiamento de fosfato;
- Algumas vezes a liberação satisfatória não pode ser atingida até a fina moagem devido à alta dispersão dos grãos finos disseminados;
- A flotação de partículas é complexa, por um lado, devido ao tamanho do grão fino necessário, o processo de moagem exige um alto padrão técnico, por outro lado, a adoção de um processo de flotação ordinário não é capaz de separar as impurezas efetivamente. Algumas vezes processos complicados são adotados, como múltiplos estágios de flotação e recirculação de rejeitos.

A técnica de flotação foi patenteada em 1906 e permitiu a mineração de corpos de minério de baixo teor e complexos que poderiam por outro lado ter sido considerados não econômicos sem o uso dessa técnica (Wills, 2006).

A seletividade do processo de flotação se baseia no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Nos sistemas de flotação a fase líquida é sempre a água, uma espécie polar, e a fase gasosa é quase sempre o ar, constituído basicamente por moléculas apolares. Uma substância hidrofóbica pode agora ser mais bem caracterizada como aquela cuja superfície é essencialmente não polar, tendo maior afinidade com o ar que com a água (CHAVES, 2009).

O controle do pH é uma das variáveis mais importantes na flotação que afetam a coleta, por isso, os reagentes para ajustá-lo são chamados reguladores (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). A ação dos reguladores ou modificadores consiste em ajustar o pH do sistema, controlar o estado de dispersão das partículas na polpa, facilitar e tornar mais seletiva a ação do coletor, e ainda, tornar um ou mais minerais hidrofílicos e imunes à ação do coletor (CHAVES, 2009).

Na concentração por flotação a solubilidade dos minerais corresponde a um parâmetro muito importante, sendo que minerais como apatita, calcita e dolomita são conhecidos pela sua solubilidade moderada e, em contato com a água, entram em processo de dissolução, dependendo das condições relativas a solução, como pH, força iônica, temperatura e a presença de outras espécies químicas na solução, dessa forma, afeta a eficiência da flotação, resultante do balanço eletrostático ocasionado pelas reações adicionais (hidrólise, complexação, adsorção e precipitação bulk ou superficial) que os íons dos minerais parcialmente solubilizados realizam com as espécies encontradas em solução (GONTIJO; SANTOS, 2017).

Para mudar o caráter da superfície da apatita utilizam-se reagentes químicos, denominados coletores, os quais são surfactantes que possuem uma cadeia hidrocarbônica, formada por grupos polares e apolares capazes de adsorverem na superfície da apatita, mudando seu caráter de hidrofílico para hidrofóbico. Especificamente, no caso da apatita, o reagente bastante utilizado é o ácido carboxílico. Os ácidos carboxílicos, com diferentes tamanhos de cadeia carbônica, adsorvem na superfície da apatita através do processo de quimissorção, ou seja, há precipitação na superfície, de um sal de ácido carboxílico (BARROS, 2005; CHAVES, 2009).

No caso das apatitas provenientes de rochas ígneas, caso da maior parte dos minérios fosfáticos brasileiros, o desenvolvimento de reagentes químicos capazes de separar o mineral apatita, a partir de um minério com diferentes minerais de gangas, principalmente de minerais

carbonatíticos, foi o grande marco do desenvolvimento da tecnologia mineral no Brasil na década de 60, período em que o professor Paulo Abib Andery desenvolveu o processo de concentração de apatita a partir do uso de ácido graxo como coletor de apatita e da utilização de amido de milho como depressor dos minerais de ganga, para a chaminé alcalina carbonatítica de Cajati (CHAVES, 2009).

O desempenho da flotabilidade das apatitas também é uma característica intrínseca de cada apatita, de cada depósito mineral, o que está relacionado à sua origem, ao seu tipo (primária ou secundária), a suas substituições químicas e suas associações minerais (BARROS, 2005). Em relação a flotabilidade de diversas apatitas de depósitos nacionais, no estudo de LENHARO em 1994, verificou-se que as apatitas primárias apresentam um melhor desempenho na flotação, sendo que as apatitas secundárias apresentaram desempenho inferior devido à associação com óxido-hidróxido de ferro.

Além da característica do minério, origem e condições de flotação um parâmetro tão importante quanto é o tamanho da partícula na flotação, no trabalho de (SANTANA et al., 2008) verificou-se que as partículas finas e grossas apresentam diferentes comportamentos na flotação, sendo necessárias condições de dosagem de reagentes diferenciadas. Além disso, as partículas grossas, faixa +65# e +100#, apresentaram maiores teores de  $P_2O_5$  no concentrado de apatita, em contrapartida apresentando recuperações baixas, por outro lado, as partículas finas, -400#, obtiveram recuperação altas e não atendimento à especificação de teor de  $P_2O_5$  no concentrado de apatita.

A quantidade de estudos realizados na procura por rotas de beneficiamento para os minérios fosfáticos demonstra a importância e a dificuldade de se obter um concentrado que se adeque as especificações de recuperação e seletividade na separação do mineral útil dos minerais de ganga. São diversas as opções na utilização de reagentes, porém deve ser levado em consideração o ambiente geológico e os processos de formação do minério, pois cada caso se mostra completamente distinto entre si (GONTIJO; SANTOS, 2017). Além disso, as especificações para o concentrado final são as mesmas, ou seja, teor de MgO (proveniente da dolomita) menor do que 1%, razão em peso  $CaO/P_2O_5$  não deve exceder 1,6 e razão  $Al_2O_3/P_2O_5$  ou  $Fe_2O_3/P_2O_5$  menor que 0,095. Além disso, o concentrado deve ter um teor de  $P_2O_5$  maior que 35% e recuperações de apatita são consideradas satisfatórias em torno ou acima de 60% (GONTIJO; SANTOS, 2017; SANTANA et al., 2008).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Sete amostras de materiais duros da mina foram disponibilizadas com tamanhos 100% passante em 3,36 mm. As amostras identificadas correspondem aos tipos de materiais cimentados em se tratando de litologia e perfil intempérico no depósito de acordo com a Tabela 4.1. A classificação dos materiais se fez pelo tipo de cimento predominante, tendo em vista que o cimento foi gerado pela precipitação supergênica de apatita, quartzo e goethita, como os minerais predominantes.

As amostras foram separadas em cinco alíquotas, sendo uma para ensaio de caracterização do BWI (Índice de trabalho de Bond de moagem de bolas), outra para análise de liberação MLA (Mineral Liberation Analyser), outra para difração de raios X (DRX), análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) e as alíquotas restantes, moídas em tamanho de flotação para testes de flotação em bancada.

As análises de MLA só foram realizadas nas amostras pilha 80/2017, amostra de cimento de quartzo e cimento de quartzo com goethita, abrangendo as amostras que são mais presentes no depósito.

##### 4.1. Testes de Flotação

##### 4.1.1. Materiais, Reagentes e Equipamentos

Tabela 4.1. – Identificação, perfil intempérico e cimentação das amostras

Amostra	Litologia	Perfil	Friabilidade	Cimentação
P39818	Dolomita Carbonatito	Oxidado	Duro	Quartzo com Goethita
P39820	Foscorito	Micáceo de Topo	Duro	Quartzo com Apatita
P39826	Nelsonito	Oxidado	Duro	Apatita com Goethita
P39828	Dolomita Carbonatito	Oxidado	Duro	Quartzo
P39829	Dolomita Carbonatito	Micaceo de Topo	Duro	Goethita
P39830	Foscorito	Oxidado	Duro	Apatita com Quartzo
P39831	Apatita Carbonatito	Oxidado	Duro	Apatita
Pilha 80/2017	Blend específico			

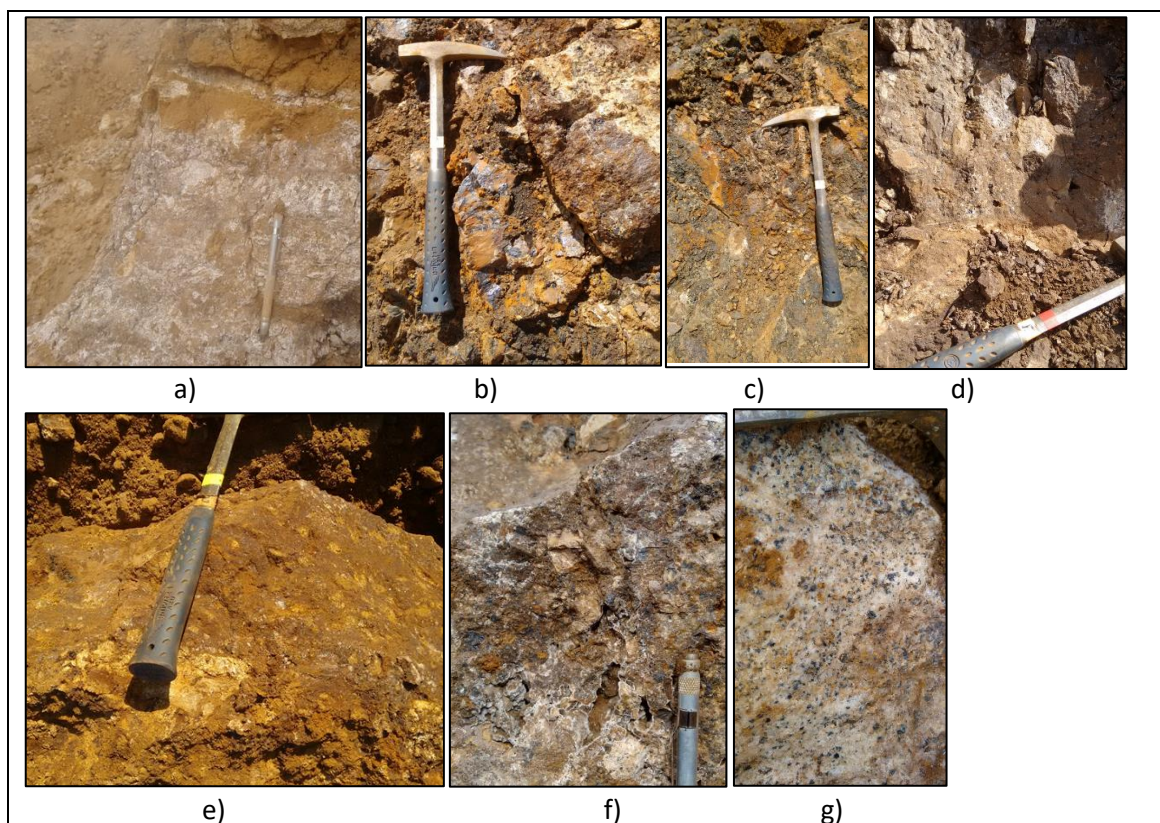


Figura 9. Fotografia das amostras caracterizadas: a) Cimento de Quartzo com Goethita; b) Cimento de Quartzo com Apatita; c) Cimento de Apatita com Goethita; d) Cimento de Quartzo; e) Cimento de Goethita; f) Cimento de Apatita com Quartzo; g) Cimento de Apatita.

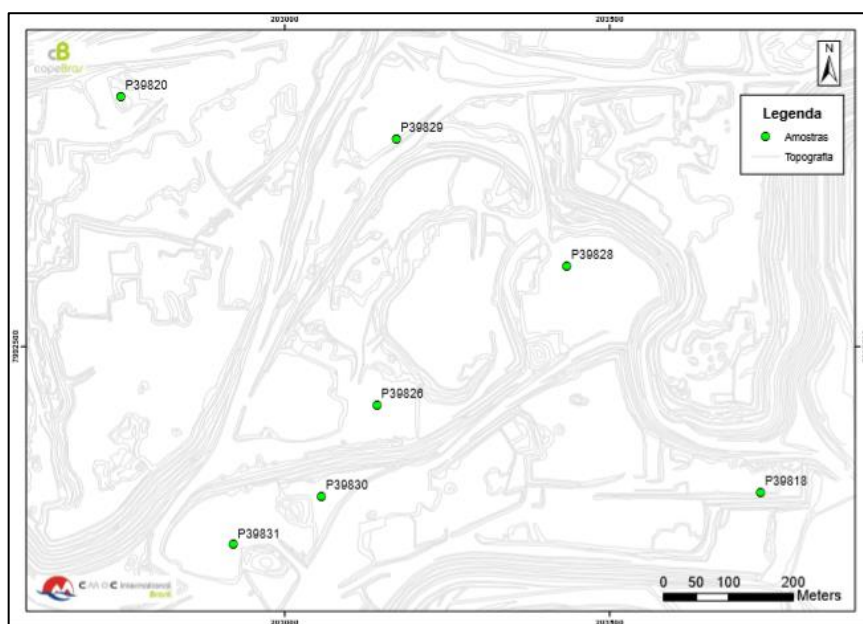


Figura 10. Mapa localização das amostras caracterizadas no estudo.



#### 4.1.1.1. Materiais

O estudo constou da utilização de: provetas de 2L; baldes de 20L; cuba para flotação de 2L; pipeta para adição dos reagentes; béqueres de 250mL, utilizados para preparar os reagentes; bastões de vidro; agitador magnético; espátula; jarras de plástico de 2 L; bandejas de alumínio; recipientes plásticos (bacias de 3L);

#### 4.1.1.2. Reagentes

Os reagentes utilizados nas etapas de flotação, concentração e funções estão descritos na tabela 4.II. abaixo:

Tabela 4. II. – Reagentes e suas concentrações utilizados nos processos de flotação

Circuitos	Reagentes	Concentração %	Funções
Flotação de Barita	Lupromim FPB 715	4,3	Coletor
	Flotanol	100	Espumante
Flotação de Apatita	Lioflot 567	6	Coletor
	Flotisor 5730	100	Tensoativo
	Amido	7,5	Depressor
	NaOH	12	Controle de pH

##### 4.1.1.2.1. Preparação de Coletor de Barita

O coletor de barita utilizado nos testes foi o Lupromin FP B 715 da BASF, segundo o fornecedor trata-se de uma mistura de ácidos graxos, C18-insaturados, dímeros, polímeros com tall-oil e trietilenotetramina em água. O reagente é preparado a uma concentração de 4,5%: Para preparar uma solução de 500mL, adiciona-se lentamente sob agitação constante 22,5g do coletor à 500mL de água destilada sob agitação (temperatura ambiente). A dosagem do coletor nos testes é adicionada no volume calculado em mL através da utilização de uma pipeta, proporcional a dosagem em g/t requerida para o teste.

##### 4.1.1.2.2. Preparação do Amido como Depressor

O depressor utilizado foi o amido de milho, fubá de milho Flokit 415 do fornecedor Kowalski, sua gelatinização alcalina foi realizada por adição de 15g de hidróxido de sódio a uma solução de 400 mL de água destilada e 37,5g de amido (temperatura ambiente). A solução foi

mantida sob agitação constante até completa gelatinização. Adicionou-se água destilada à solução até o seu volume atingir 500 mL, produzindo uma concentração final de 7,5% de amido de milho.

#### 4.1.1.2.3. Preparação do Coletor de Apatita

O Lioflot 567 da Miracema Nuodex foi escolhido como coletor de apatita. De acordo com o fabricante, o coletor é uma mistura de ácidos carboxílicos (92,62% do volume), ésteres, e triglicerídeos, todos eles de origem vegetal, especialmente desenvolvido para o fosfato de rocha ígnea brasileira. A saponificação do coletor foi realizada adicionando 12,96g do coletor a 100 ml de água destilada a quente (em torno de 95°C) sob agitação magnética. Água destilada foi adicionada à solução até que seu volume atingisse 200 mL, produzindo uma dosagem final de 6% do coletor.

#### 4.1.1.3. Equipamentos

1. Balança;
2. pHmetro marca Digimed, digital;
3. Máquina de flotação Denver;
4. Conjunto de deslamagem, hidrociclone de 40mm, Weir;
5. Moinho de barras piloto;
6. Moinho de bolas piloto;
7. Separador magnético de baixa intensidade, Inbrás;
8. Separador magnético de alta intensidade, Inbrás.

#### 4.1.2. Procedimento Testes de Flotação

O teste de bancada padrão para flotação de apatita segue o procedimento padrão PCT.13.001.050 interno da empresa que é representado na Figura 11 abaixo:

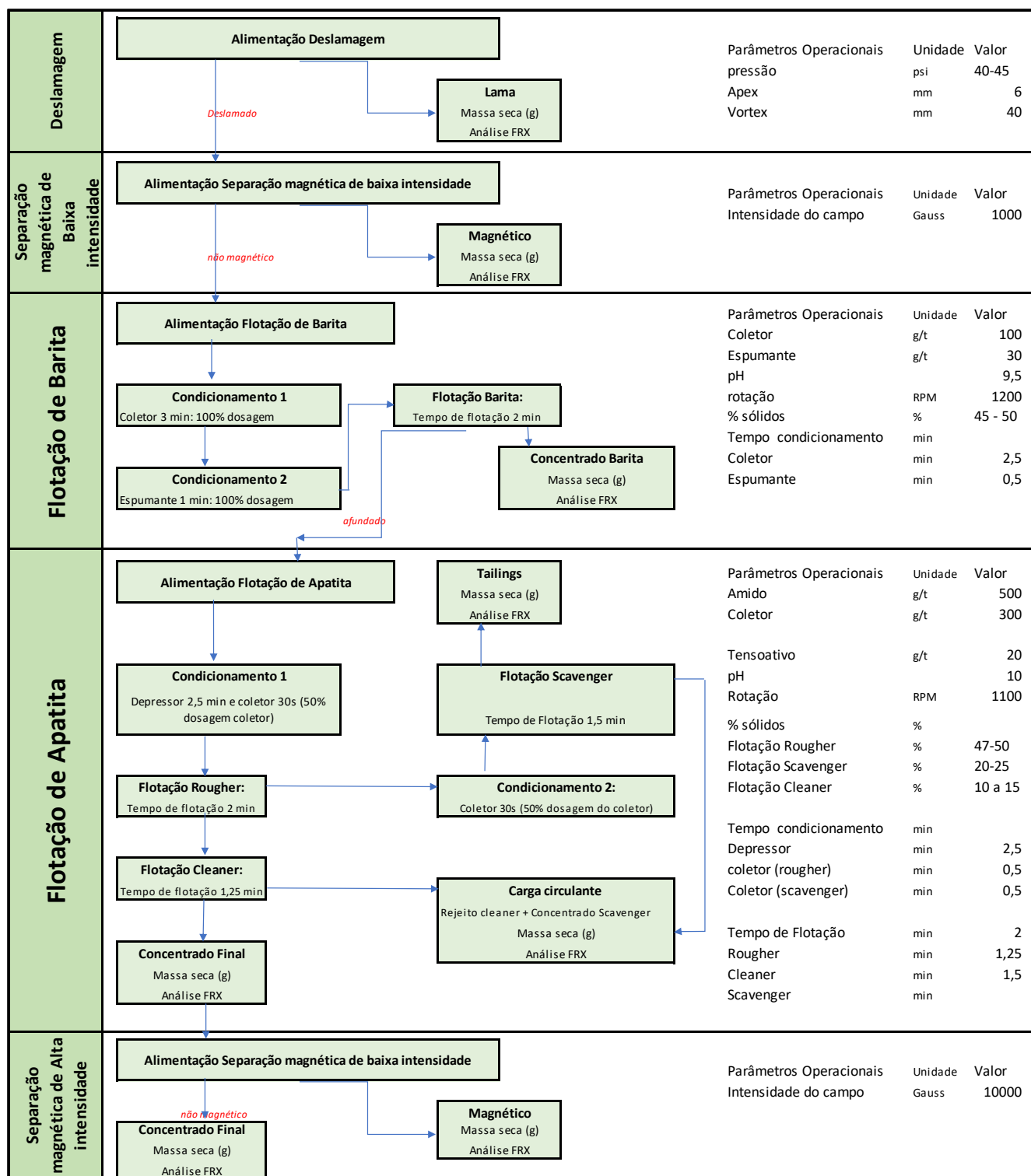


Figura 11. Procedimento PCT 13.001.05 Copebrás CMOC International/CMOC para testes de flotação de apatita em bancada.

O teste de flotação padrão inicia-se com a moagem da amostra em moinho de barras para ser classificada em P95 de 208 $\mu$ m, equivalente a 65 mesh (#).

Depois de moída e classificada na malha de corte a amostra foi deslamada em hidrociclone de 40mm da Weir onde se separa a lama, partículas de tamanho inferior a 30 $\mu$ m. A amostra deslamada é submetida ao processo de separação magnética de baixa intensidade, a uma intensidade de campo de 1.000 Gauss, onde se separa a magnetita.

Depois das etapas de separação física, separação magnética de baixa intensidade e deslamagem, a amostra é submetida ao processo de flotação de barita, onde adiciona-se coletor de barita e espumante nas condições descritas na Figura 11, o concentrado de barita é então separado quantificado e seu teor analisado quimicamente, o afundado desta etapa é destinado ao processo de flotação de apatita.

A polpa destinada ao processo de flotação de apatita é adicionada em uma proveta de volume e peso conhecido e através do conhecimento de densidade específica do sólido é possível calcular a densidade da polpa e também o percentual de sólidos da amostra. O objetivo é que a flotação de apatita na etapa rougher ocorra das condições de % de sólidos especificadas na Figura 11. Com o conhecimento da massa disponível na cuba, calcula-se os volumes de reagentes a serem adicionados durante o teste conforme as condições estabelecidas na Figura 11.

O próximo passo é a flotação propriamente dita, onde adiciona-se a polpa à cuba, adiciona-se em seguida o depressor, faz-se o condicionamento, sob agitação durante dois minutos. Adiciona-se à polpa 50% da dosagem estimada de coletor de apatita e condiciona-se a polpa sob agitação durante meio minuto, após o condicionamento adiciona-se o tensoativo. Após essa etapa ajusta-se o ar e inicia-se a coleta de espuma/flotado durante dois minutos, o flotado é separado para ser flotado subsequentemente na etapa cleaner, porém antes disso, ao afundado da etapa rougher adiciona-se o restante das 50% da dosagem estimada de coletor e condiciona-se este durante meio minuto, posteriormente ajusta-se o ar e inicia-se a coleta de espuma de concentrado scavenger durante um minuto e meio, o concentrado scavenger e o rejeito scavenger, também denominado rejeito final são separados para quantificação em massa e análise química dos teores através de FRX. O concentrado rougher separado é disposto em uma cuba menor para realização da etapa de flotação cleaner, nesta etapa não há adição de reagentes apenas coleta de espuma durante 1,25 minutos, esse produto flotado é o concentrado final da flotação de apatita. Ao final do processo de flotação os produtos flotado cleaner, rejeito cleaner, concentrado scavenger e rejeito scavenger são separados, a massa é quantificada e

analisada quimicamente para se obter o teor dos elementos através da técnica de fluorescência de raios X.

O concentrado flotado na etapa de flotação de apatita passa pelo último estágio de concentração denominado separação magnética de alta intensidade, a um campo magnético de cerca de 10.000 Gauss com objetivo de retirar a fração magnética de óxidos de ferro ainda presente no concentrado de apatita e atender às especificações em teor de óxido de ferro.

#### **4.2. Ensaio de BWI**

A britagem da amostra para o WI foi realizada de modo estagiado para minimizar a produção de finos até que o material se tornasse 100% passante em 3,35 mm.

A moagem foi executada, conforme norma ABNT MB 3253, em moinho de 305 x 305 mm a 70 RPM, utilizando carga de 285 esferas de aço superalloy com diâmetros entre 15,9 e 36,5mm.

A massa de alimentação do primeiro ciclo foi definida por meio de ensaios de compactação em proveta. O peneiramento foi conduzido com abertura de referência de 212 microns. Com base na granulometria da alimentação e na quantidade de material passante na abertura de referência, calculou-se o número de rotações para os próximos ciclos, até que o valor da moabilidade, expresso em gramas de material passante por rotação se estabilizou.

Ao final do ensaio foi realizada a análise granulométrica do produto, determinação do P80, sendo o Índice de Trabalho WI calculado em kWh/short ton e também em kWh/ton , calculado pela equação de Bond.

##### **4.2.1. Equipamento**

Moinho de Bond equipado com sistema de controle incluindo painel elétrico, temporizador, contador de rotações e inversor de frequência.

### **4.3. Análises Químicas por Fluorescência de Raios-X**

As amostras foram inicialmente secas em estufa a 105°C por 12 horas. Para determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI), as amostras foram calcinadas 900 °C por 2 horas. A uma alíquota de 1g de amostra previamente calcinada foi fundida com 9g de tetraborato de lítio. As medidas de fluorescência de raios-X (FRX) foram realizadas em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. A calibração foi realizada com o pacote GeoQuant M da Bruker composto por padrões de rochas e 47 minerais naturais. Os valores obtidos estão representados em porcentagem de massa para os óxidos de elementos maiores, em base úmida.

### **4.4. Caracterização de Minérios por Difração de Raios-X**

As análises foram realizadas no laboratório CRTI em Goiânia. As medidas de difração de raios-X (DRX) foram realizadas em um difratômetro Bruker D8 Discover.

Utilizou-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para  $K\alpha_1$  operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano  $\theta$ - $2\theta$ , detector unidimensional Lynxeye®, intervalo de  $2\theta$  de 5° a 100°, com passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida. A determinação da composição modal foi realizada pelo método de Rietveld, que se baseia no ajuste de uma composição calculada ao difratograma experimental medido.

### **4.5. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura**

As análises foram feitas após fixação das amostras em fita adesiva de carbono sobre porta amostras de latão, e recobrimento com carbono como material condutor. As imagens foram obtidas com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-IT300 operado em alto vácuo, com tensão de aceleração de elétrons de 15 kV. A inspeção composicional foi realizada pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), com um detector de raios-X Oxford Instruments X-MaxN.

#### 4.6. Análise de Liberação Mineral – MLA

A análise de liberação mineral foi realizada pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) com um detector de raios-X Oxford Instruments X-MaxN, acoplado a um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-IT300. O microscópio eletrônico foi operado em alto vácuo, com tensão de aceleração de elétrons de 15kV.

A análise de liberação mineral, aquisição, processamento de imagens e classificação química dos grãos foi executada nos softwares INCAFeature da Oxford Instruments e GrainAnalyzer. O modo de detecção de elétrons retroespalhados foi utilizado nas análises e permitiu separar as diferentes fases minerais presentes nas partículas em função da variação de tom de cinza, que é proporcional ao número atômico médio de cada fase mineral. Foi feita a separação dos limiares (thresholds) de tons de cinza possibilitando o isolamento das principais fases do minério: 2 limiares para a ganga, 1 limiar para apatita, 1 limiar para a barita e outro para o pirocloro, sulfetos e fosfatos de terras raras. Cada threshold foi analisado por EDS durante 0,10 segundos.

Os espectros EDS foram quantificados pelo software e classificados quimicamente como uma fase de composição conhecida, dentro de limites estequiométricos aceitáveis para cada uma das fases. Espectros desconhecidos puderam ser analisados novamente de maneira a minimizar o número de feições não identificadas em cada amostra para menor que 1,5% em área. Em geral, os espectros não classificados são finos demais para resolução espacial da análise ( $< 2 \mu\text{m}^2$ ) ou artefatos analíticos (grãos arrancados ou feições de relevo) e não representam impacto significativo na análise. Para cada fração foram analisadas no mínimo 6 mil e no máximo 27 mil partículas. A magnificação foi otimizada de maneira a se obter aproximadamente 100 partículas por área garantindo um tamanho de pixel mínimo sempre menor que  $2 \mu\text{m}$ , assegurando boa resolução também para análise de grãos menores.

A análise por EDS não é sensível à estrutura das fases minerais analisadas. Dessa maneira, minerais polimorfos e compostos cujas variações são apenas nos teores dos constituintes voláteis ou na valência dos metais que foram identificados na difratometria de raios X, foram agrupados em uma única fase mineral na análise de liberação. Por exemplo a magnetita, hematita, goethita e outros óxidos ou hidróxidos de ferro foram agrupados em “Óxidos/Hidróxidos de Ferro”; quartzo, sílica mistura foram agrupados em “Quartzo”.

A distribuição modal da apatita permite que uma grande quantidade de grãos do mineral seja detectada em cada amostra (sempre acima de mil grãos), garantindo uma representatividade estatística. Por outro lado, o baixo teor de barita e pirocloro, implica em um número de grãos analisados relativamente pequeno (cerca de 20 a 100 grãos), apesar de todos serem classificados e quantificados corretamente.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise de Fluorescência de Raios X para as amostras estudadas

Na tabela 5.I. abaixo são apresentados os teores dos principais óxidos presentes nas amostras estudadas, bem como os teores especificados para qualidade do concentrado de apatita destinados às Unidades Produtoras de Fertilizantes.

Tabela 5.I. – Resultados de análises de FRX para as amostras pilha 80/2017, demais cimentos existentes no depósito de fosfato e especificação industrial do concentrado final.

Amostra \ Teor (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	BaO
Pilha 80/2017	14,87	18,91	34,81	17,35	1,23	1,06
Cimento de Quartzo	10,88	14,14	11,62	54,09	0,1	1,89
Cimento de Quartzo com Goethita	7,08	7,43	36,48	18,28	0,01	17,65
Cimento de Apatita	27,75	37,13	25,62	0,85	1,23	0,24
Cimento de Apatita com Quartzo	20,18	26,99	40,44	5,6	1,07	0,19
Cimento de Quartzo com Apatita	15,23	20,25	50,04	8,21	1,78	0,08
Cimento de Apatita com Goethita	14,26	19,55	56,74	4,5	1,07	0,09
Cimento de Goethita	6,71	8,43	28,29	48,61	0,25	0,61
Especificação Concentrado final de Apatita	≥36,5	-	≤ 2,9	≤ 3,5	≤ 0.50	≤ 0,8

### 5.2. Caracterização Tecnológica Pilha 80/2017

A pilha 80 processada em 2017 apresentou-se heterogênea entre as demais amostras, por se tratar de um blend (mistura), cerca de 70% desse blend é composto por apatita (37,42%), quartzo (19,07%) e hematita (13,94%).

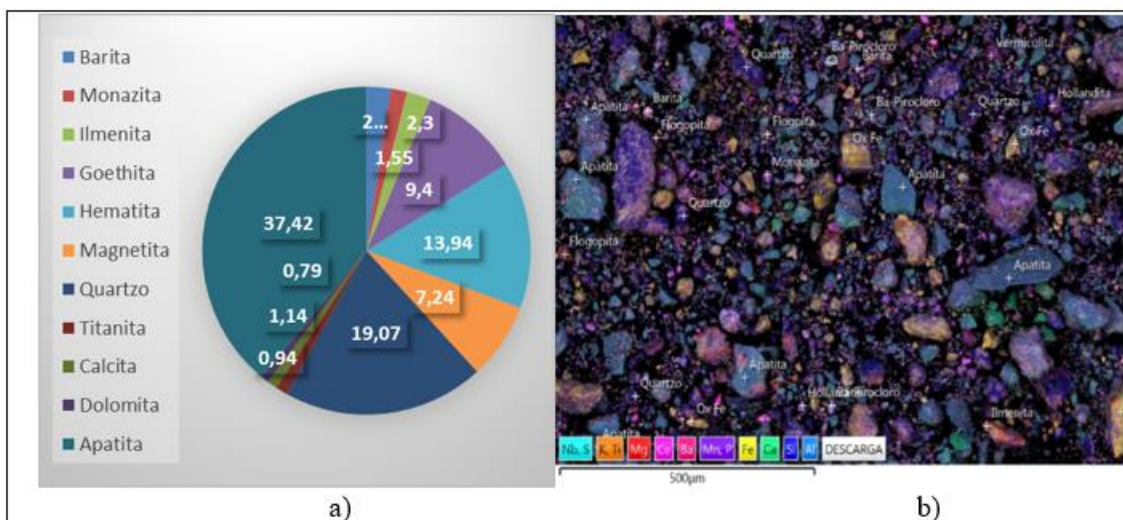


Figura 12. Caracterização mineralógica da amostra pilha 80/2017. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV, imagem global.

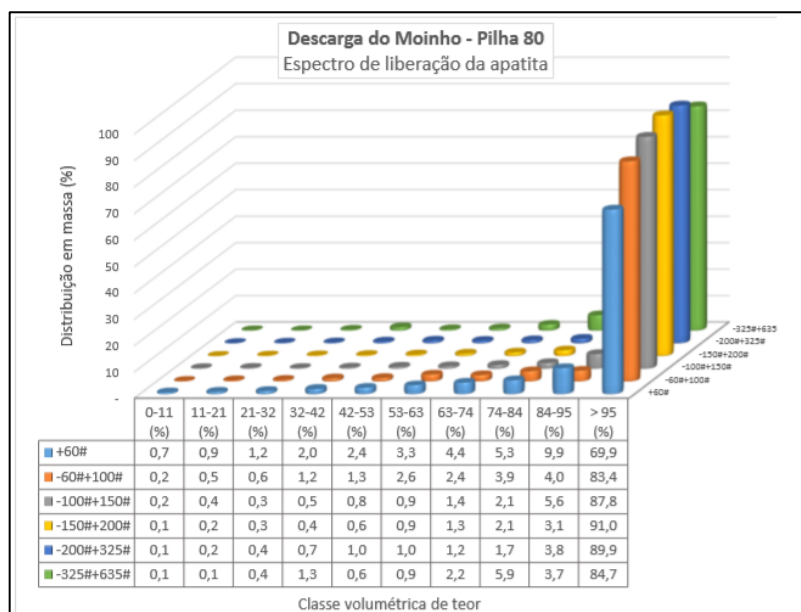


Figura 13. Liberação individualizada da apatita nas frações: +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra descarga do moinho Pilha 80/2017 – Fonte: CRTI.

Os espectros de liberação medidos para apatita estão apresentados na figura 13 por fração granulométrica analisada.

Não foram consideradas as contribuições volumétricas de cada fração, ou seja, a distribuição do grau de liberação em cada fração sempre soma 100%. Para o presente trabalho consideram-se partículas “livres” as que contém acima de 95% em massa do mineral analisado

(apatita). As partículas “liberadas” contêm de 84% até 95% em massa do mineral analisado. Partículas não-liberadas são todas as partículas que contêm menos que 84% do mineral em questão. Nos gráficos de associação mineral, figura 14, a classificação denominada “não associada” representa os grãos constituídos exclusivamente do mineral de interesse, isto é, sem registro de associação binária ou complexa. A classe denominada como “associação complexa” reúne as partículas onde o mineral de interesse está associado com dois ou mais minerais de outro tipo. Todas as demais classes são compostas por associação binária, ou seja, o mineral de interesse mais um mineral distinto. Na classe “outros” estão computadas as associações binárias de pouca expressão (< 0,1% do total), as partículas de tamanho menor que 2 µm (undersize) e as que não puderam ser classificadas quimicamente (nunca representando mais do que 1,5% do total).

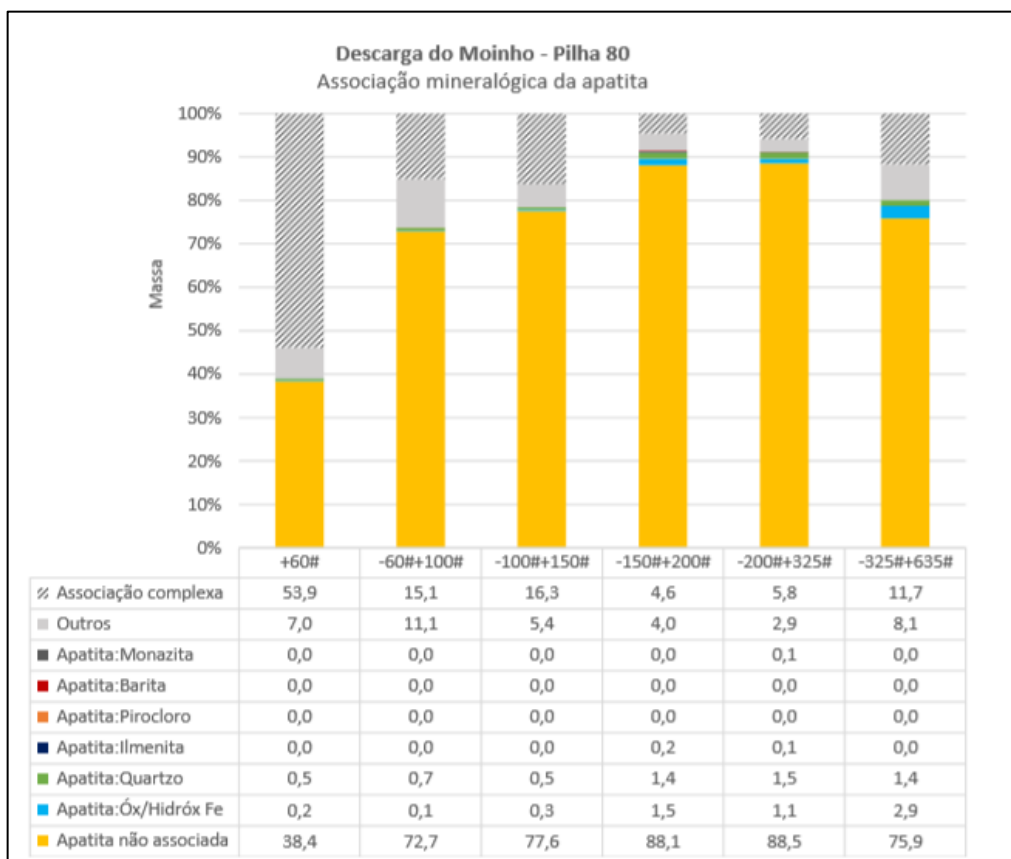


Figura 14. Associação mineralógica da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra descarga do moinho Pilha 80/2017 – Fonte: CRTI.

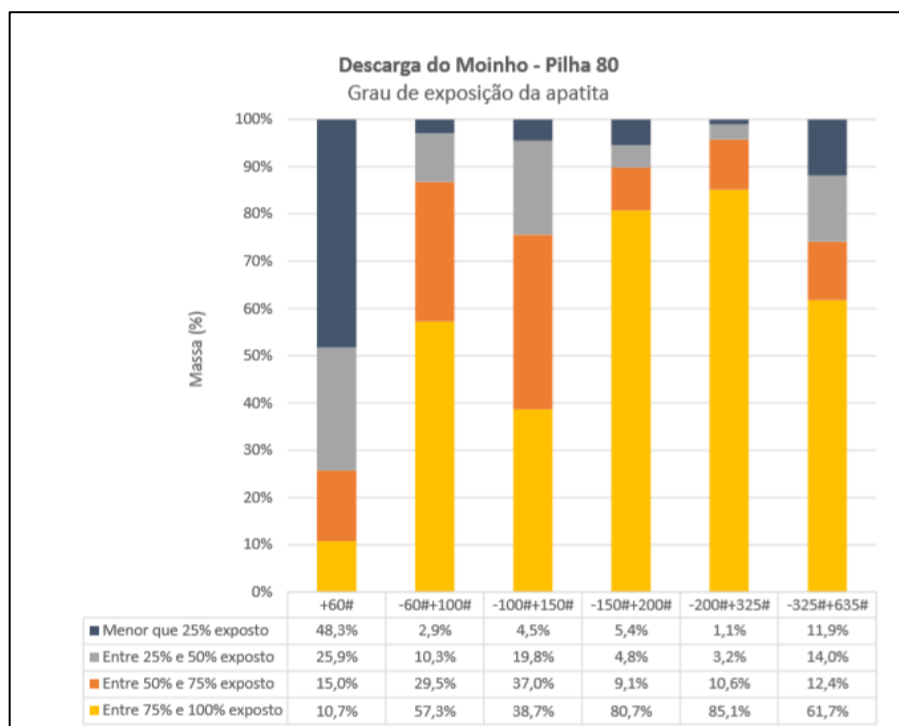


Figura 15. Grau de exposição da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, 150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra descarga do moinho Pilha 80/2017 – Fonte CRTI.

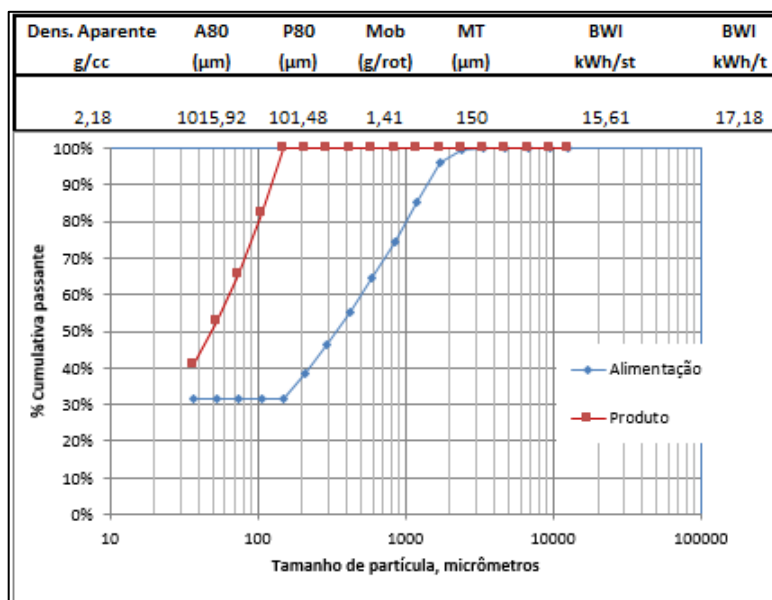


Figura 16. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas para a amostra pilha 80/2017.

A pilha 80/2017 obteve um valor de WI significativamente alto: 17,18 kWh/t se comparado com a média praticada nas usinas de aproximadamente 14 kWh/t, sendo importante destacar que a formação dessa pilha constou da soma de 12% de cimento de quartzo, com 18% de cimento de apatita e 70% de material friável e que a maior consequência observada foi a

dificuldade de alimentação, redução de “throughput” (t/h alimentada) em função do aumento da carga circulante na moagem, além da dificuldade de atendimento à qualidade especificada de  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado final de apatita. A alimentação média para esta pilha foi de 14.800 t/dia contra um orçamento de 17.000 t/dia e produção de 3.901 t/dia contra um orçamento de 4.250 t/dia.

A análise de liberação da Amostra do Blend pilha 80/2017 demonstra que 90% da apatita se encontra livre entre as frações de 150# e 325#, ou seja, partículas menores que  $105\mu m$  e maiores que  $55\mu m$ , as apatitas presentes nas partículas menores que  $55\mu m$  apresentam-se em sua composição 80% liberadas, porém com maior associação com óxidos e hidróxidos de ferro. Outra informação relevante é que o parâmetro de classificação na operação de moagem de bolas e classificação em carga circulante das usinas 47 e 76 do Complexo é de P80 de  $130\mu m$ , dentro desta realidade é esperado que nas condições de operação normal de moagem e classificação não se libere toda apatita presente na amostra, impactando em aumento potencial de perdas e na baixa recuperação global como um todo.

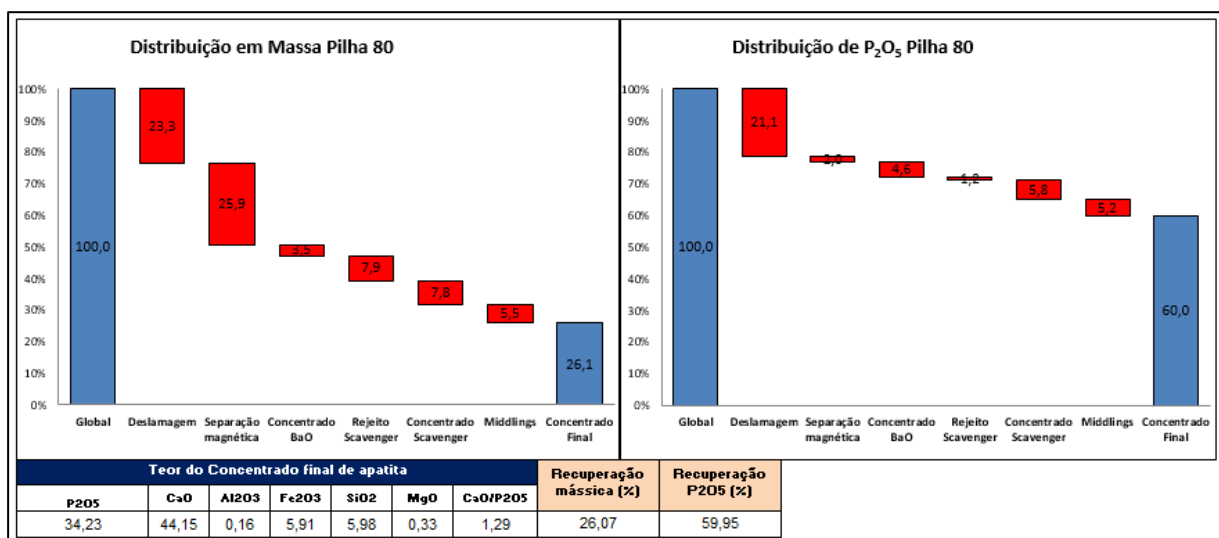


Figura 17. Distribuição em massa e de  $P_2O_5$  por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra do blend da pilha 80/2017.

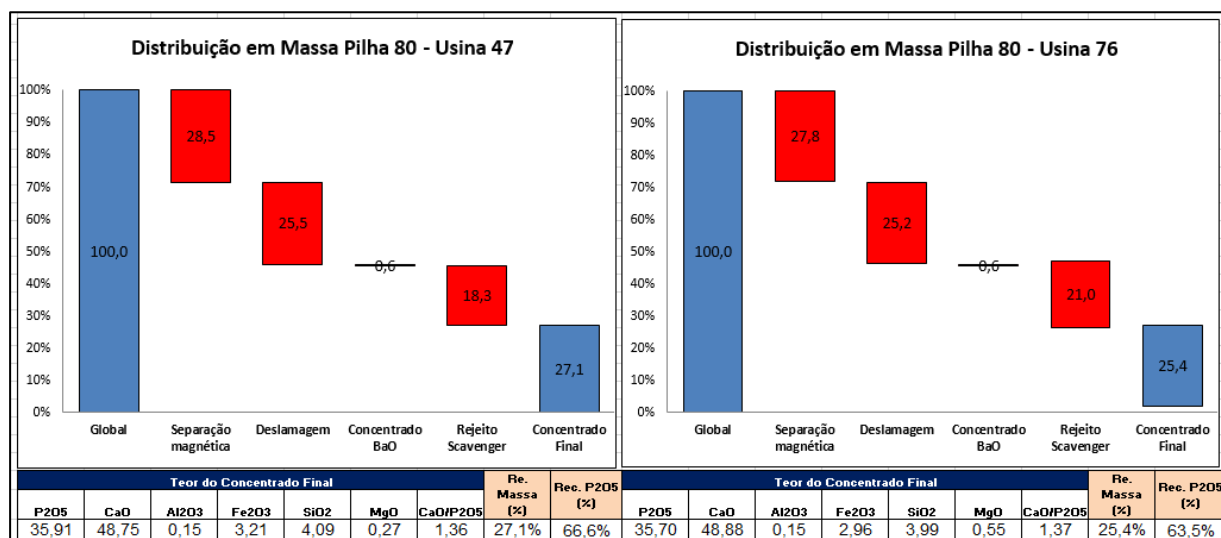


Figura 18. Distribuição em massa e de  $P_2O_5$  por etapa e qualidade do concentrado de apatita obtido no período que a pilha 80/2017 foi processada nas Usinas 47 e 76 do Complexo Copebrás/CMOC International.

Em comparação ao teste batch o resultado global obtido durante o processamento da pilha 80 nas usinas de concentração denominadas 47 e 76 localizadas no Complexo Chapadão em Ouvidor, Goiás, foi similar em eficiência: recuperação mássica global de 26,36% e recuperação metalúrgica de  $P_2O_5$  de 64,6%. No que se refere a qualidade do concentrado de apatita, as suinas se saíram melhor em teor de  $P_2O_5$  e nos dos principais contaminantes em relação ao teste batch, mas ainda assim não atendendo à especificação apresentada na tabela 5.I.

### 5.3. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Quartzzo

A amostra de Cimento de Quartzzo apresenta mais de 80% da composição total de quartzzo (50%) e apatita (33%) o que explica o alto teor de  $SiO_2$  obtido na análise de FRX de 54,09% da amostra conforme apresentado na tabela 5.I.

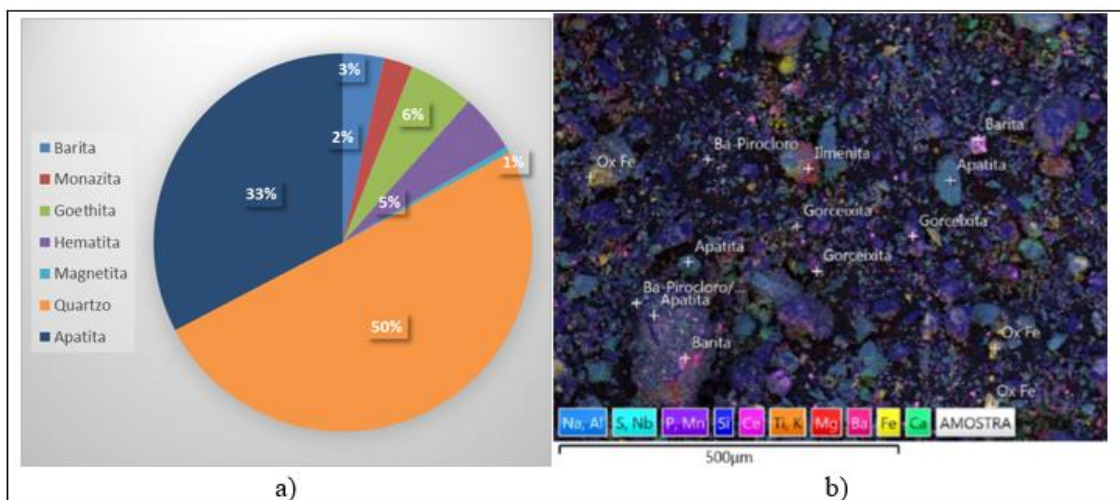


Figura 19. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Quartzo. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

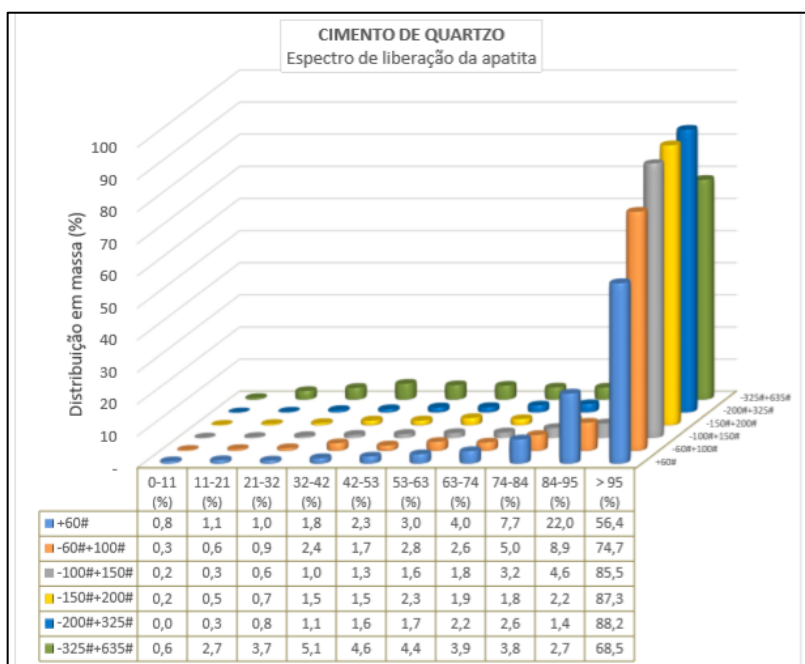


Figura 20. Liberação individualizada da apatita nas frações: +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Cimento de Quartzo – Fonte: CRTI.

O mesmo critério estabelecido na análise de associação mineralógica para amostra da pilha 80/2017 foi adotado para interpretação dos dados e elaboração do gráfico da figura 21 que apresenta os tipos de associações mineralógicas presentes na amostra de Cimento de Quartzo.

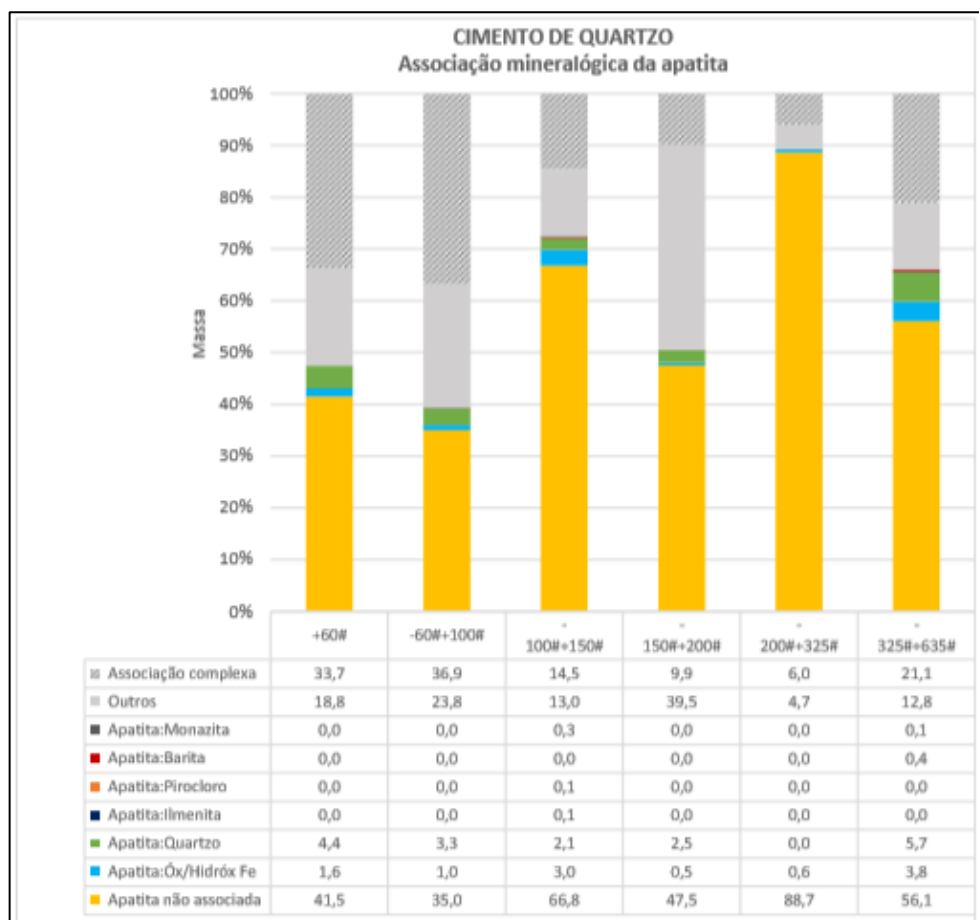


Figura 21. Associação mineralógica da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo – Fonte: CRTI.



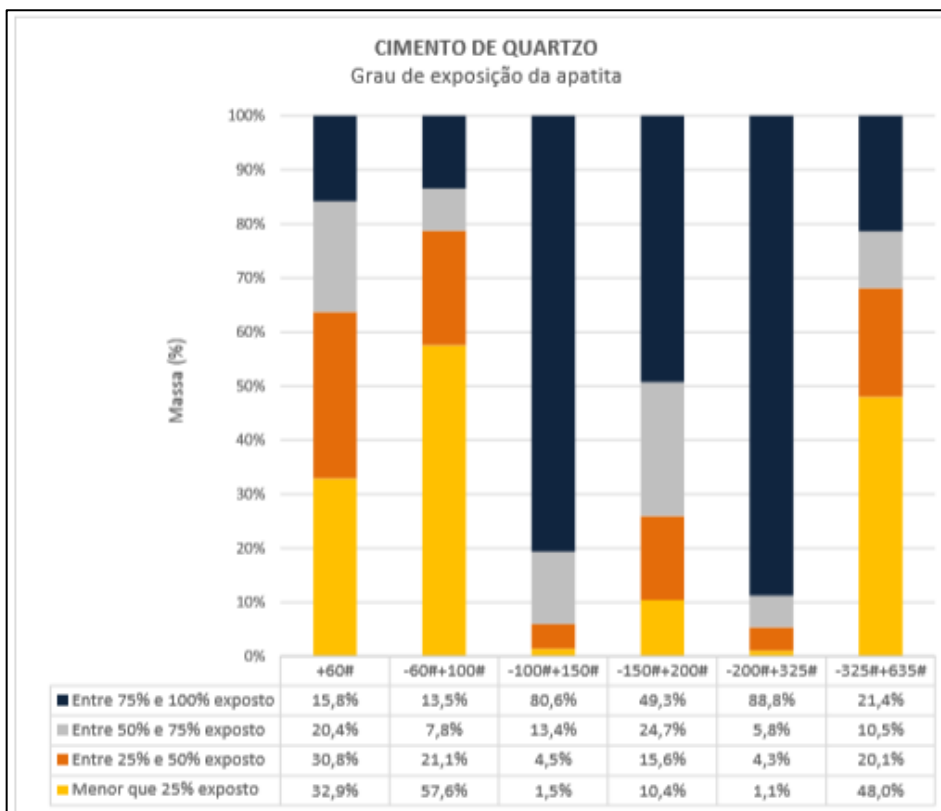


Figura 22. Grau de exposição da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, 150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo – Fonte: CRTI.

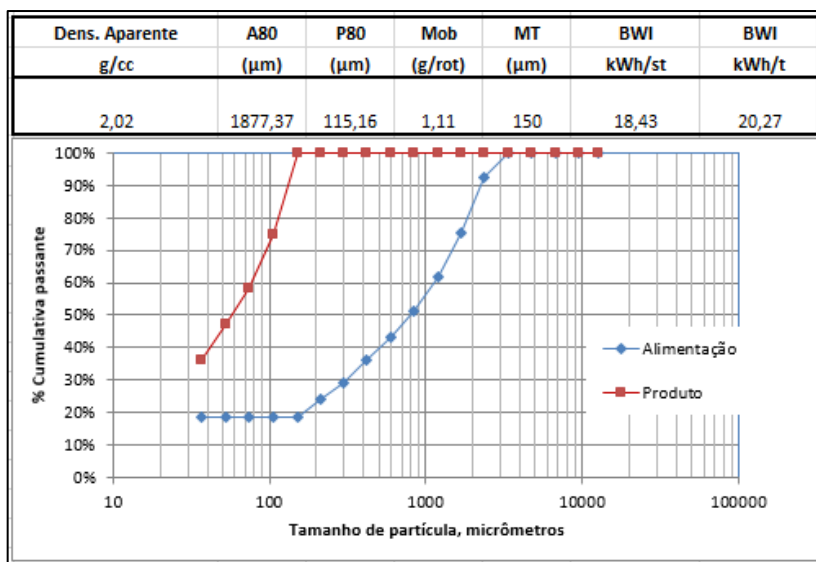


Figura 23. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Quartzo.

A amostra de Cimento de Quartzo puro apresentou valor de WI expressivamente alto 20,27 kWh/t que comparada à média praticada nas Usinas de aproximadamente 14 kWh/t, demonstra que esse é um material que contribui significativamente para redução taxa horária na alimentação das usinas, impactando em menor produtividade. É preciso advertir que o maior

custo dentro da operação de beneficiamento está na moagem, representando cerca de 50% dos custos globais da operação de beneficiamento como um todo. O valor de 20 kWh/t significa que esse minério necessita de 42,8% mais de energia se comparado aos 14 kWh/t usuais.

As análises de liberação na associação mineralógica demonstram que a apatita para esse caso não é tão facilmente liberada, necessitando de um alto e diferenciado grau técnico para moer especificamente esse mineral. Observado que a malha com a melhor condição de liberação é entre 200# e 325#, ou seja, maior que 74 $\mu$ m e menor que 55 $\mu$ m, cujo valor é de 88% de apatita não associada, essa possibilidade indica necessidade de trabalhar com condições de moagem ainda mais desafiadoras se comparadas às praticadas pelas usinas do complexo atualmente, afim de se obter grãos ainda mais finos, o que é complexo, necessitando de uma avaliação técnica se o custo dessa operação, bem como os possíveis impactos compensariam tal alteração.

Ainda sobre a análise de liberação, outra possibilidade é que na faixa entre 100# e 150# têm-se menor percentual de apatita livre, 66,6%, adicionado ao fato de que nessa fração apresenta-se 3% de apatita associada à óxidos e hidróxidos de ferro, bem como 2,1% de apatita associada a quartzo, indicando potencial de partículas mistas no circuito, o que pode dificultar o atendimento à qualidade dentro do especificado na tabela 5.I., bem como menor potencial de recuperação do mineral do circuito. Essa condição de trabalho é a condição próxima ao praticado pelas usinas no processo de moagem de bolas e classificação em circuito fechado, cujo P80 é de cerca de 130  $\mu$ m.

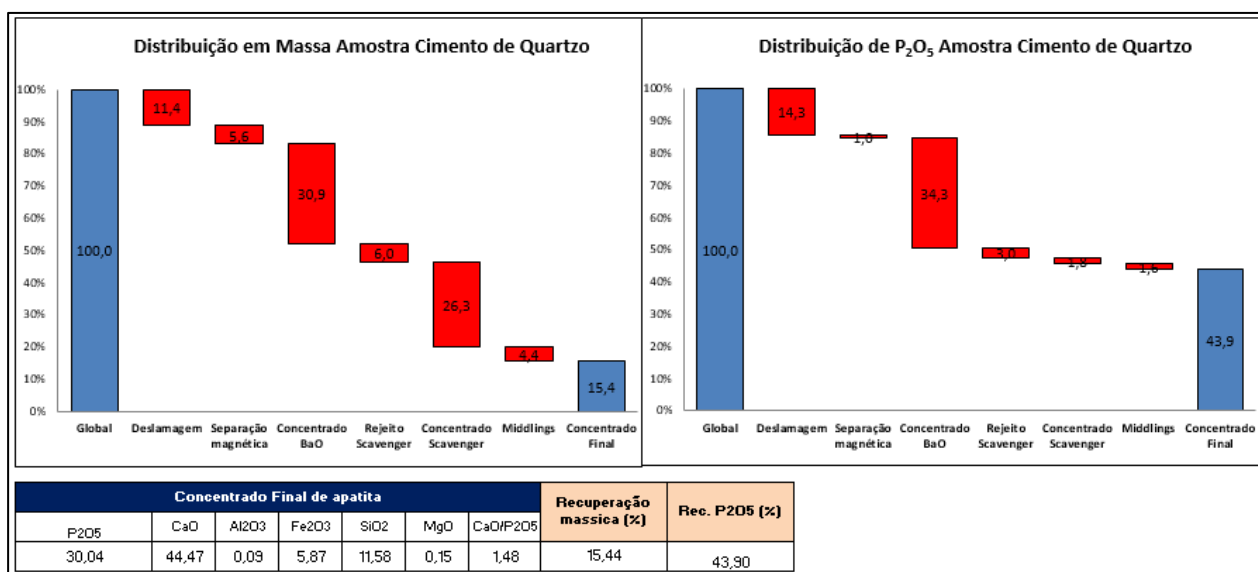


Figura 24. Distribuição em massa e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Quartzo.

O teste padrão para a amostra de cimento de quartzo indicou que nas condições padrão de processamento, essa amostra obteve baixa recuperação mássica e metalúrgica, 15,4% e 43,9% e teores de qualidade do concentrado de apatita fora dos limites especificados na tabela 5.1.: 30,04% de  $P_2O_5$ ; 5,87% de  $Fe_2O_3$  e 11,58% de  $SiO_2$ .

Esse é um tipo de cimento, entre os demais cimentos, que é mais presente no depósito, e ao longo desse trabalho será ainda demonstrado o impacto do incremento percentual desse tipo de cimento na pilha referência 80/2017 sob o processo de flotação, mas apenas com essa análise de caracterização individual é possível admitir que se trata de um tipo de cimento com liberação diferente do praticado na usina, de baixo teor de  $P_2O_5$  e que precisa de estudos de desenvolvimento diferenciados para otimizar a recuperação no processo de flotação buscando melhor seletividade.

No que diz respeito a etapa de cominuição, sem dúvida, trata-se de um material de processamento mais caro, de maior resistência que os demais.

#### 5.4. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Quartzo com Goethita

A amostra de Cimento de Quartzo com Goethita apresentou-se heterogênea, basicamente 85% de sua composição consta de quatro tipos de minerais: barita (27,42%), apatita (19,77%), goethita (19,72%) e quartzo (19,26%). Dentre os teores analisados por FRX os que mais se diferenciam do praticado na usina é o baixo teor de  $P_2O_5$ : 7,08%, alto teor de BaO: 17,65% e baixa relação  $CaO/P_2O_5$ : 1,05.

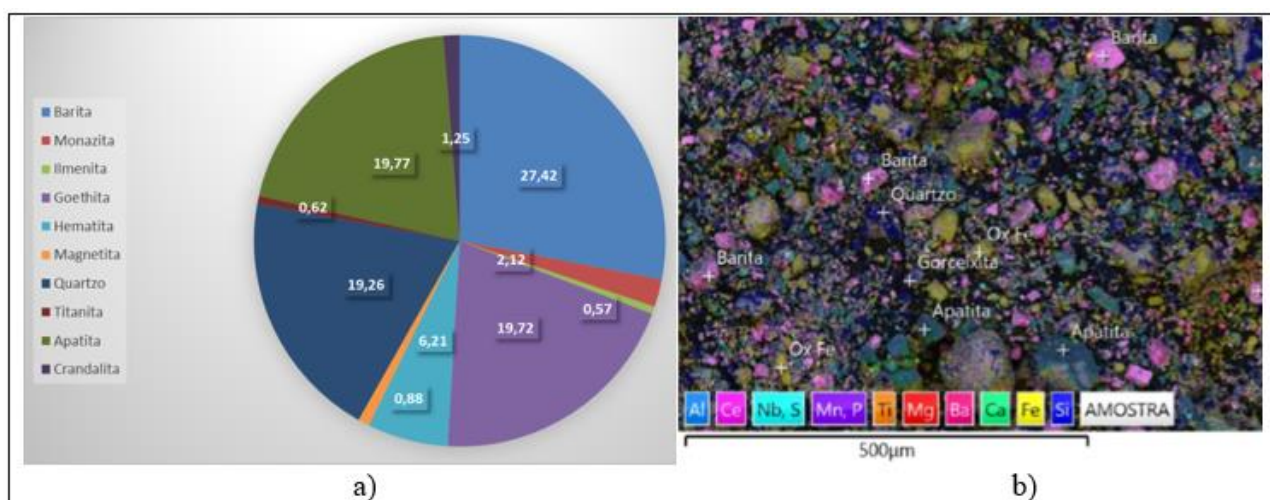


Figura 25. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Quartzo com Goethita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

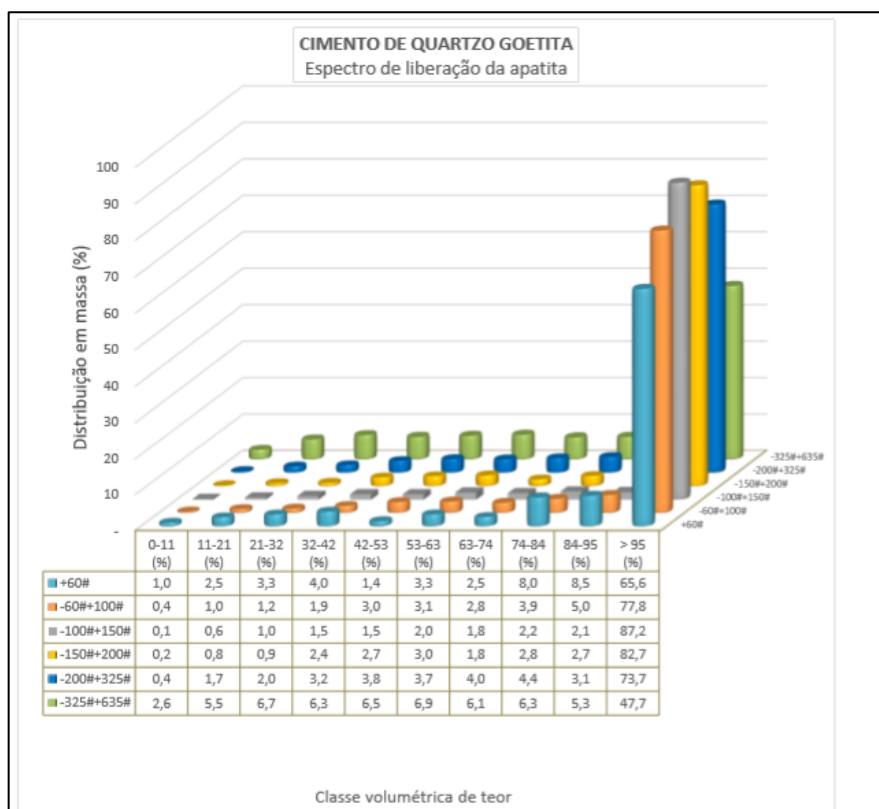


Figura 26. Liberação individualizada da apatita nas frações: +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra Cimento de Quartzo com Goethita – Fonte: CRTI.

O mesmo critério estabelecido na análise de associação mineralógica para amostra da pilha 80/2017 foi adotado para interpretação dos dados e elaboração do gráfico da figura 27 que apresenta os tipos de associações mineralógicas presentes na amostra de cimento de quartzo com goethita.

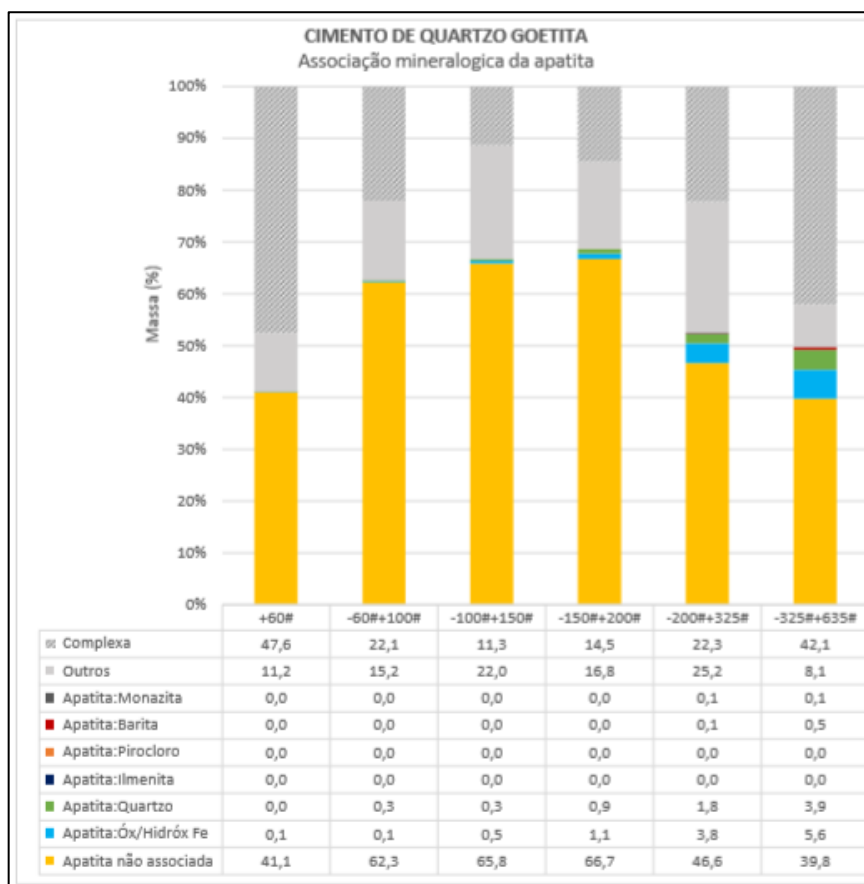


Figura 27. Associação mineralógica da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, -150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo com Goethita – Fonte: CRTI.

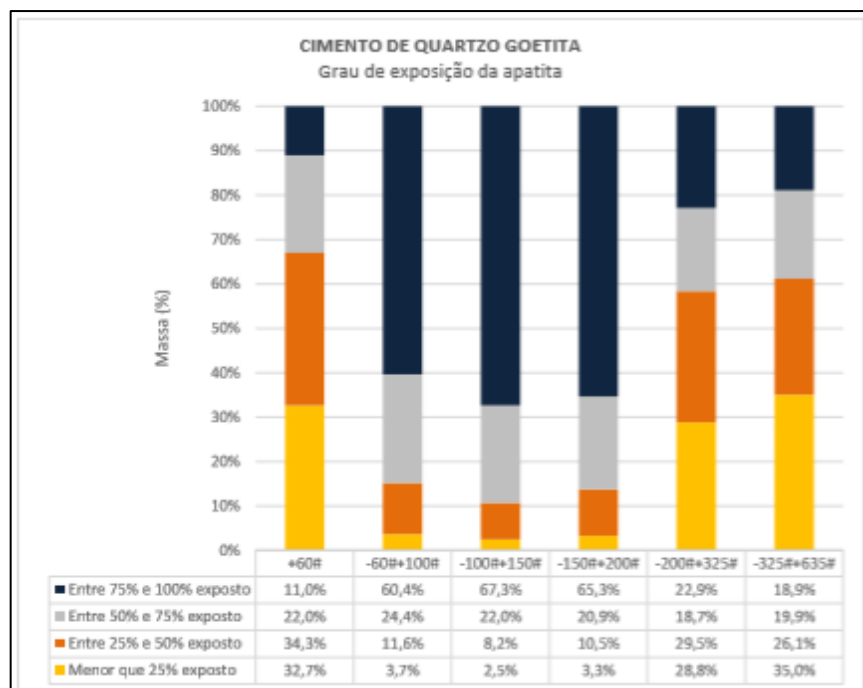


Figura 28. Grau de exposição da apatita nas frações +60#, -60# +100, 100#+150#, 150#+200#, -200#+325# e -325# +635# da amostra de Cimento de Quartzo com Goethita – Fonte: CRTI.

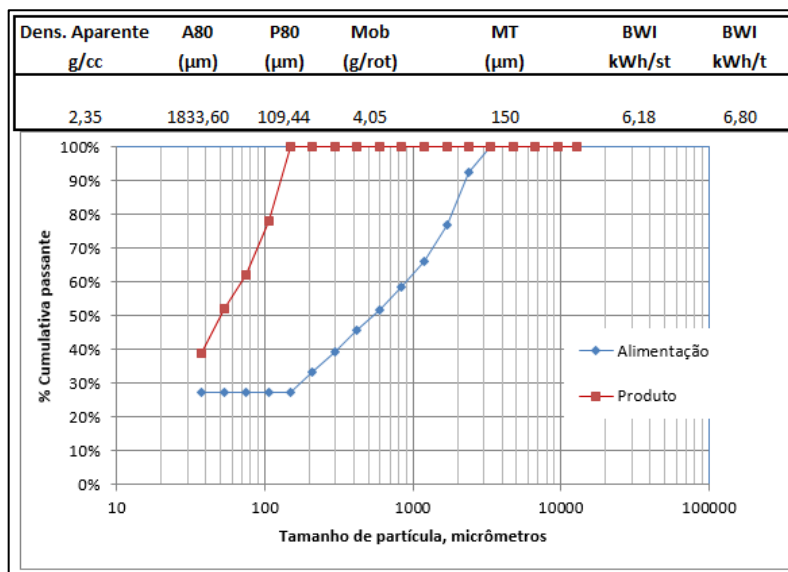


Figura 29. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Quartzo com Goethita.

O valor obtido de WI da amostra de cimento de quartzo com goethita é bem abaixo do praticado, 6,8 kWh/t, indicando que essa amostra não apresenta uma resistência alta ao processo de cominuição. As figuras referentes aos gráficos de associações mineralógicas e percentual de exposição da apatita demonstram que especialmente entre a faixa de 60# e 200# é onde se concentra a maior parte da apatita não associada e exposta, mas os valores ainda são baixos, de 60 a 67% da apatita se encontra livre entre 210  $\mu\text{m}$  e 74 $\mu\text{m}$ , indicando que mesmo sob uma técnica diferenciada de moagem não se obtém mais do que 66,7% de apatita totalmente livre.

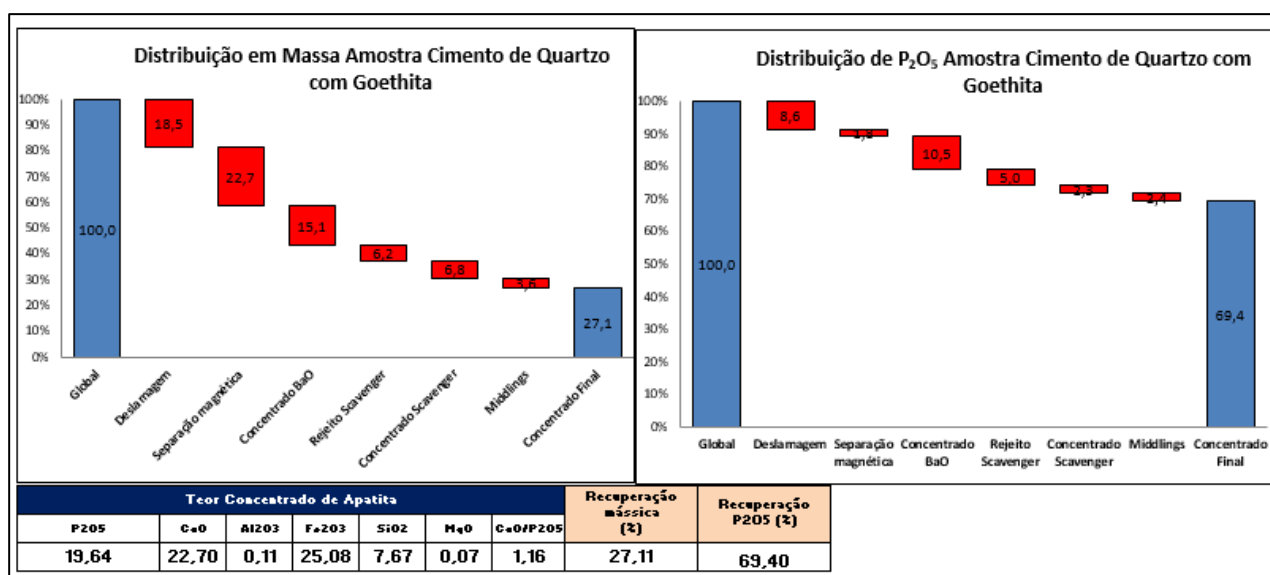


Figura 30. Distribuição em massa e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Quartzo com Goethita.

O teste padrão para a amostra de cimento de quartzo com goethita indicou que nas condições padrão de processamento, essa amostra, apesar de atingir resultados satisfatórios de eficiência, 27,11% de recuperação mássica e 69,4% de recuperação metalúrgica, apresentou baixa seletividade, com teores de qualidade do concentrado de apatita fora dos limites especificados na tabela 5.1.: 19,64% de  $P_2O_5$ ; 25,08% de  $Fe_2O_3$  e 7,67% de  $SiO_2$ , impraticáveis para as necessidades do cliente.

Esse é um tipo de cimento também muito presente no depósito e, assim como no caso do cimento de quartzo, ao longo desse trabalho será ainda demonstrado o impacto do incremento percentual desse cimento na pilha referência 80/2017 no processo de flotação.

### 5.5. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Apatita

A amostra de cimento de apatita apresenta-se mais de 70% composta por apatita pura, trata-se de blocos de apatita pura, com baixo percentual de contaminantes em sua composição. Os resultados da análise de FRX indicaram alto teor de  $P_2O_5$ : 27,75%, baixo teor de  $SiO_2$ : 0,85% e relação  $CaO/P_2O_5$  de 1,338.

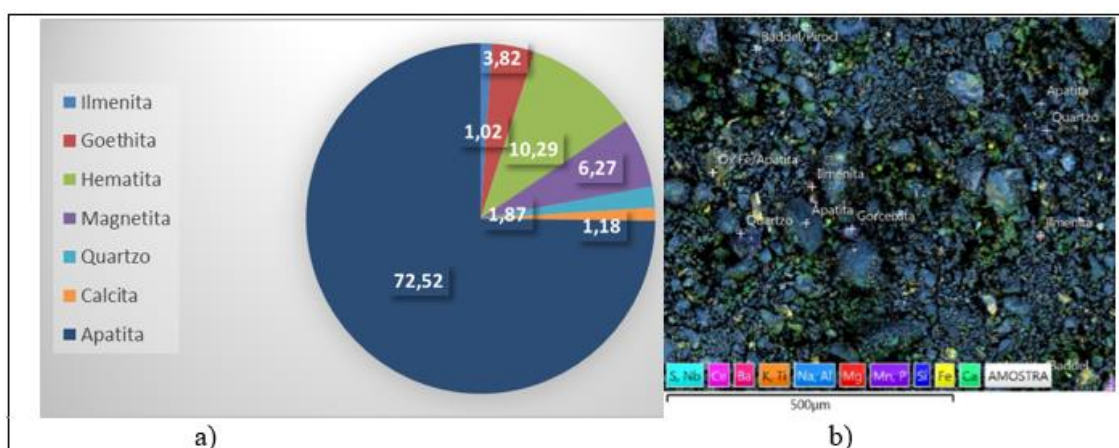


Figura 31. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Apatita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

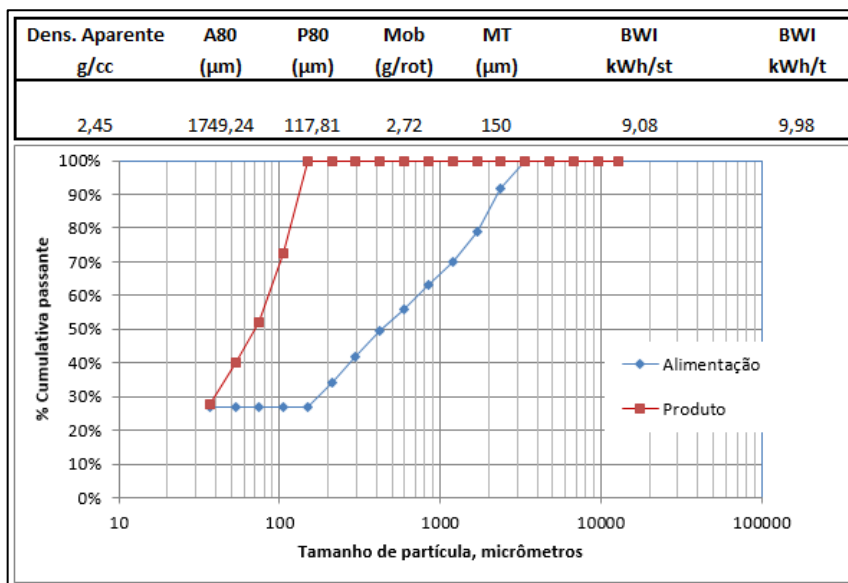


Figura 32. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Apatita.

O valor obtido de WI da amostra de cimento de apatita, 9,98 kWh/t, demonstra que a amostra não apresenta uma resistência alta ao processo de cominuição e não deve ser fonte de redução de taxa horária nas alimentações das usinas.

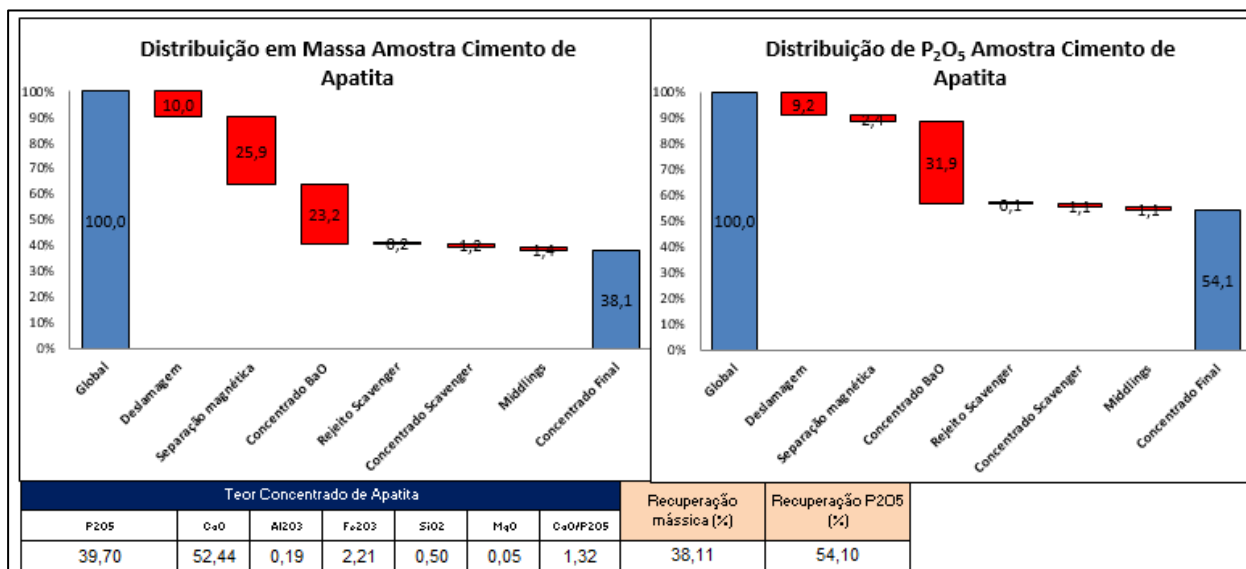


Figura 33. Distribuição em massa e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Apatita.

O resultado do teste padrão da amostra de Cimento de Apatita indica recuperações mássicas acima do praticado nas amostras de blends eventuais, com atendimento a especificação de qualidade do concentrado de apatita até superior ao especificado na tabela



5.1.. É preciso ressaltar que nas condições padrões de processamento apresentou teor de  $P_2O_5$  no rejeito final elevado, 12,57%, associado ao alto teor de  $P_2O_5$  no concentrado final de apatita, 39,70%, o que resultou em uma recuperação metalúrgica dentro da normalidade.

Os blends com adição desse cimento precisam ter um limite de participação em função da possibilidade do aumento de perdas sob condições normais de operação da usina, porém o valor de WI, 9,98 kWh/t, não é um limitante da adição desse no blend que possa impactar na produtividade.

### 5.6. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Apatita com Quartzo

A amostra de Cimento de Apatita com Quartzo apresentou mais de 75% de sua composição de apatita (51%) e magnetita (25%). As análises de FRX indicaram alto teor de  $P_2O_5$ : 20,18%, baixo teor de  $SiO_2$ : 5,6% e relação  $CaO/P_2O_5$  de 1,337.

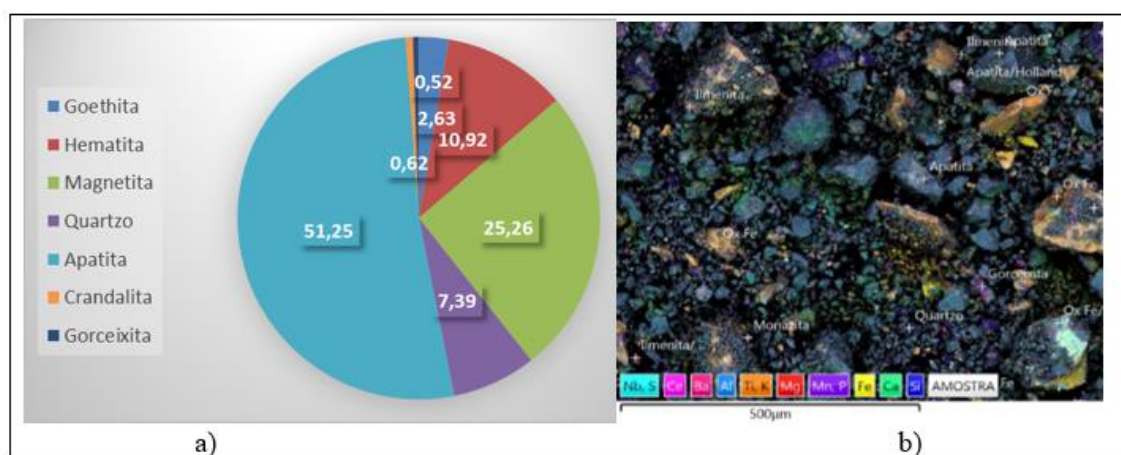


Figura 34. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Apatita com Quartzo. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

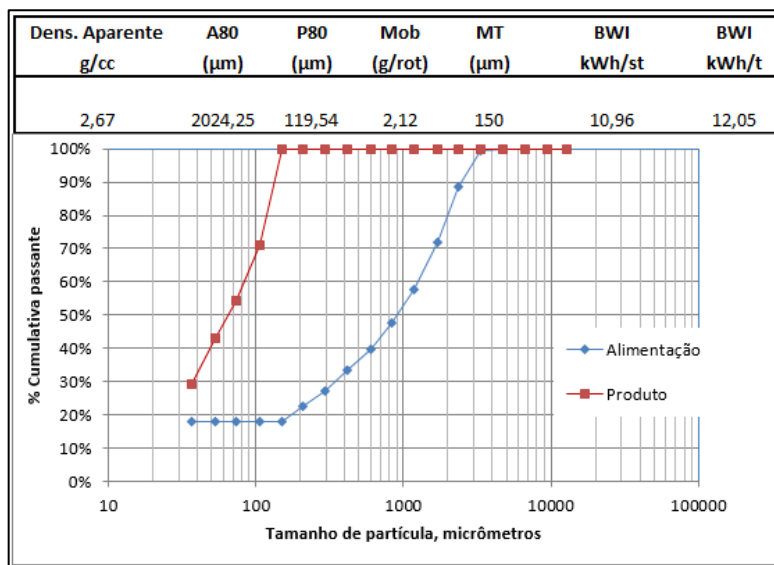


Figura 35. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Apatita com Quartzo.

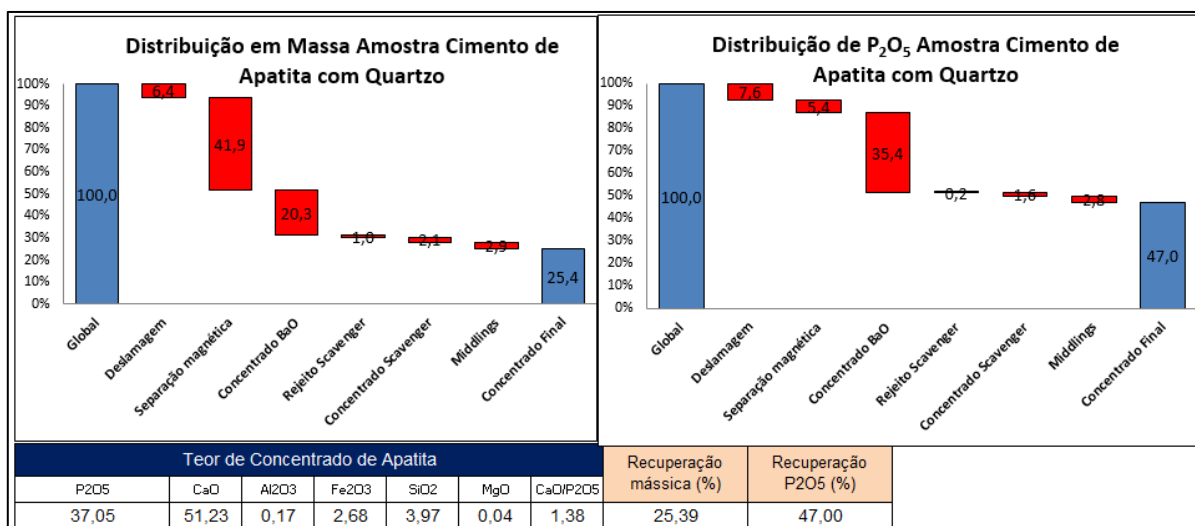


Figura 36. Distribuição em massa e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Apatita com Quartzo.

A Amostra de Cimento de Apatita com Quartzo apresenta resultados de WI (12,05 kWh/t) e comportamento na flotação em recuperação mássica (25,4%) e teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no concentrado de apatita (37,05%) semelhante aos blends praticados na usina, o maior percentual de magnetita na amostra, 41,9% não é deletério, porém o valor é expressivamente superior ao praticado nas usinas atualmente, média de 27% de magnético em massa.

O processo conta com uma etapa de separação magnética de baixa intensidade anterior ao estágio da flotação, porém o aumento superior a 30% de massa de magnéticos no blend impacta na capacidade nominal de projeto dessa operação unitária instalada nas usinas, sendo

que quantidades superiores a 30%, podem resultar em dificuldade no bombeamento do rejeito magnético, aumento da carga circulante da moagem em função da ineficiência do estágio de separação magnética de baixa intensidade, que antecede a moagem de bolas e aumento do % de magnéticos na flotação, o que pode impactar a seletividade na flotação.

### 5.7. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Quartzo com Apatita

A amostra de Cimento de Quartzo com Apatita apresentou mais de 80% de sua composição de apatita (46,64%) e magnetita (33,8%). As análises de FRX indicaram teor de  $P_2O_5$  de 15,23%, alto teor de MgO: 1,78% e relação  $CaO/P_2O_5$  de 1,33.

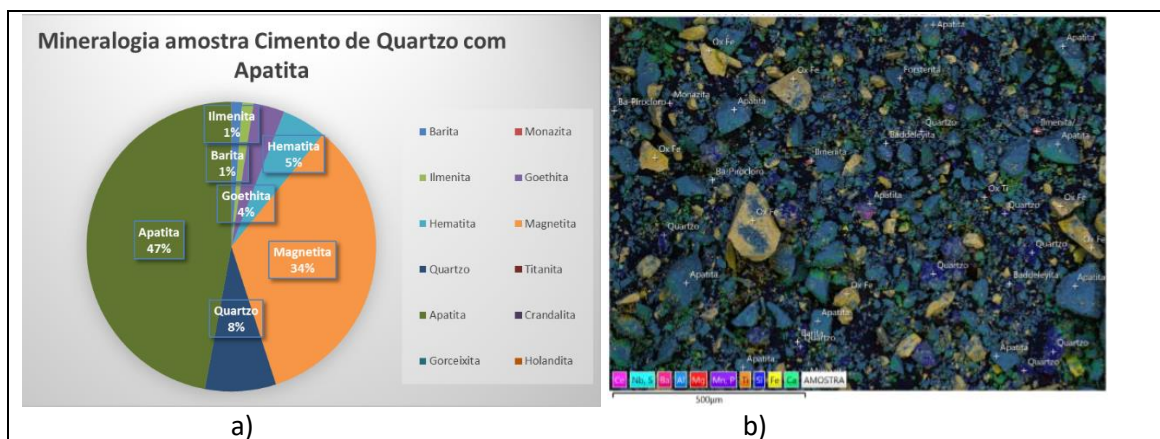


Figura 37. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Quartzo com Apatita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

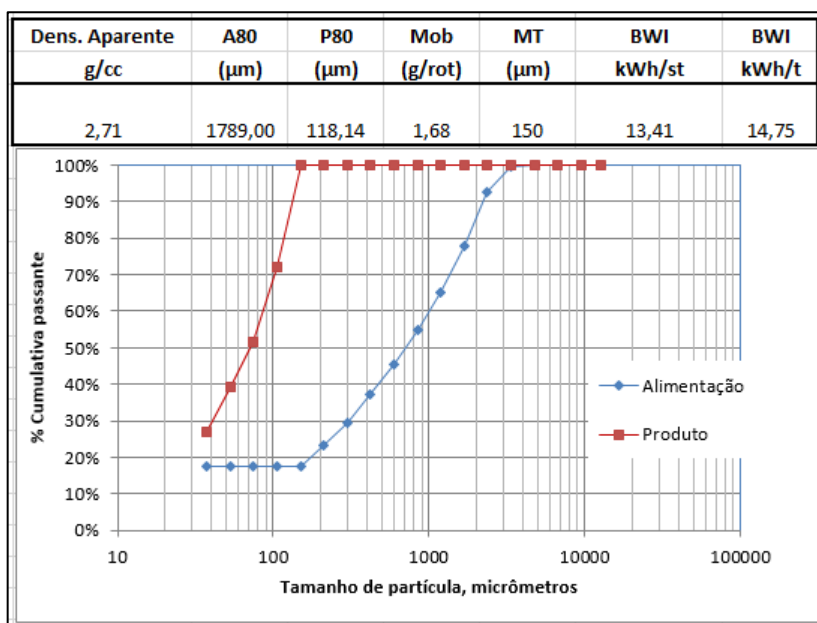


Figura 38. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Quartzo com Apatita.

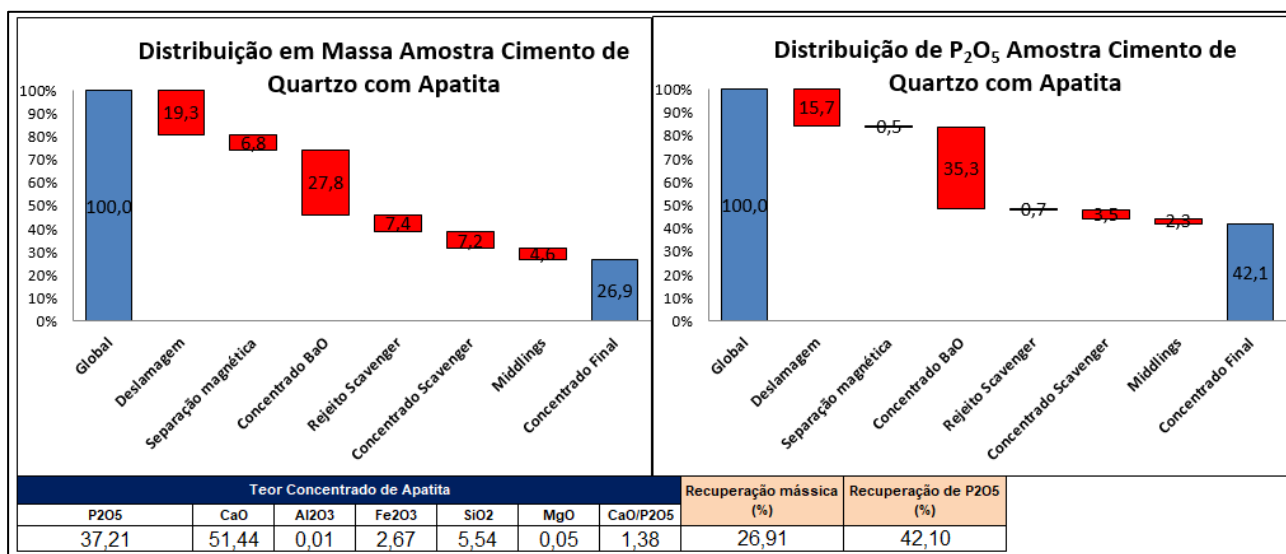


Figura 39. Distribuição em massa e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento Quartzo com Apatita.

Em relação ao valor de BWI a amostra de Cimento de Quartzo com Apatita se diferencia da amostra de cimento de Apatita com Quartzo porque apresenta um valor 22,4% mais alto, mas mesmo assim bem próximo ao valor médio ao praticado pela usina, 14 kWh/t. As recuperações mássicas e metalúrgicas dos dois cimentos na flotação são parecidas, recuperação mássica de 25,4% para o Cimento de Apatita com Quartzo e de 26,9% para o Cimento de Quartzo com Apatita e recuperação metalúrgica de 47% para o Cimento de Apatita com Quartzo e de

42,1% para o Cimento de Quartzo com Apatita. Apesar do alto teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na alimentação da amostra de cimento de quartzo com apatita, 50,04%, esse está associado ao maior percentual da magnetita presente na amostra, que é separada no estágio de separação magnética de baixa intensidade, não resultando em aumento do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no concentrado de apatita final: 2,68% para o Cimento de Apatita com Quartzo e de 2,67% para o Cimento de quartzo com Apatita.

Nas duas amostras observado aumento do teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado de apatita final: 3,97% na amostra de Cimento de Apatita com Quartzo e 5,54% na amostra de Cimento de Quartzo com Apatita.

Outro fator relevante na amostra de Cimento de Quartzo com Apatita é que apesar do alto teor de  $\text{MgO}$  na alimentação, 1,78%, os testes não indicaram contribuição negativa deste no concentrado final de apatita, apresentando teor de  $\text{MgO}$  no concentrado final de apatita de 0,05%.

#### 5.8. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Apatita com Goethita

A amostra de cimento de apatita com goethita apresentou mais de 75% de sua composição de apatita (34,83%), hematita (26,01%) e magnetita (18,49%). As análises de FRX indicaram teor na amostra inicial de  $\text{P}_2\text{O}_5$  de 14,26% e de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de 56,74% e relação  $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$  de 1,37.

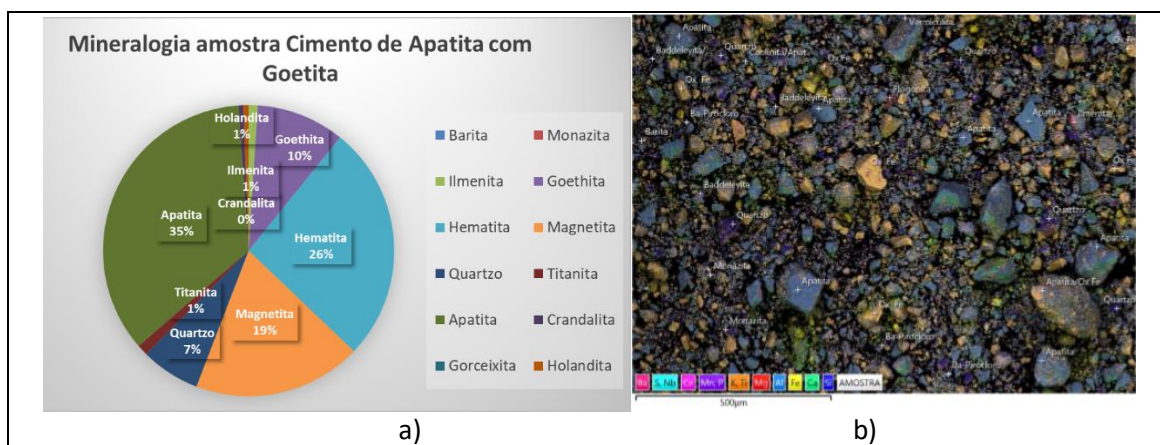


Figura 40. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Apatita com Goethita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

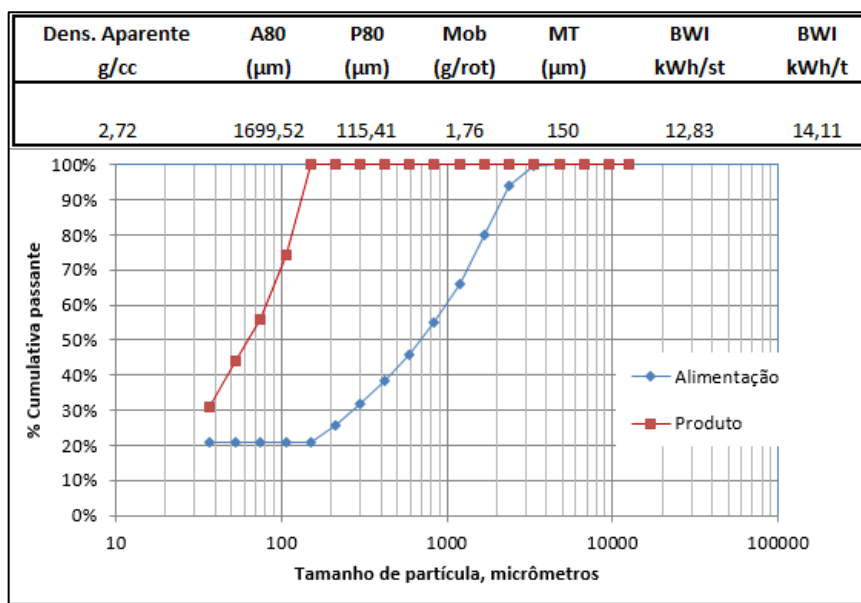


Figura 41. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Apatita com Goethita.

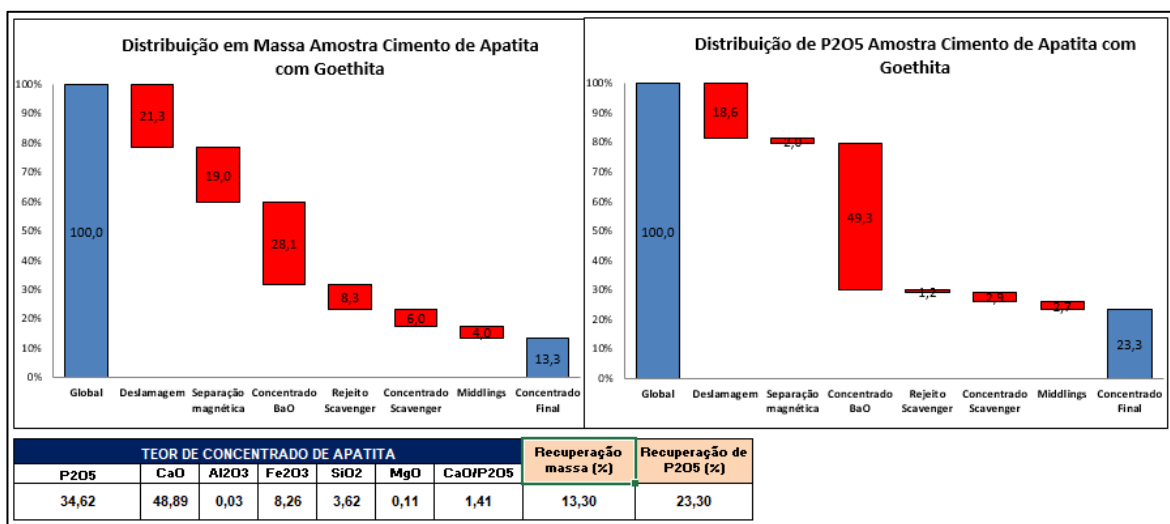


Figura 42. Distribuição em massa e de  $P_2O_5$  por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Apatita com Goethita.

Em relação ao valor de WI a amostra de Cimento de Apatita com Goethita apresenta valor próximo ao valor médio praticado pela usina, 14,11 kWh/t. A consideração mais importante em relação a essa amostra é a baixa recuperação mássica e metalúrgica: 13,3% e 23,3% respectivamente, adicionada a baixa seletividade na flotação. O teor de  $Fe_2O_3$  no concentrado de apatita atingiu valor de 8,26%, muito além do limite estabelecido pelo cliente, descrito na tabela 5.I., a relação  $CaO/P_2O_5$  também apresentou valor mais alto que o habitual, 1,41%, o que indica maior presença de carbonatos, fator que impacta na solubilidade da apatita,

influenciando na seletividade.

### 5.9. Caracterização Tecnológica da Amostra de Cimento de Goethita

A amostra de Cimento de Goethita apresentou mais de 80% de sua composição de apatita (21,07%), hematita (14,41%) e quartzo (44,84%). As análises de FRX indicaram teor na amostra inicial de  $P_2O_5$  de 6,71% e de  $SiO_2$  de 48,61% e relação  $CaO/P_2O_5$  de 1,26.

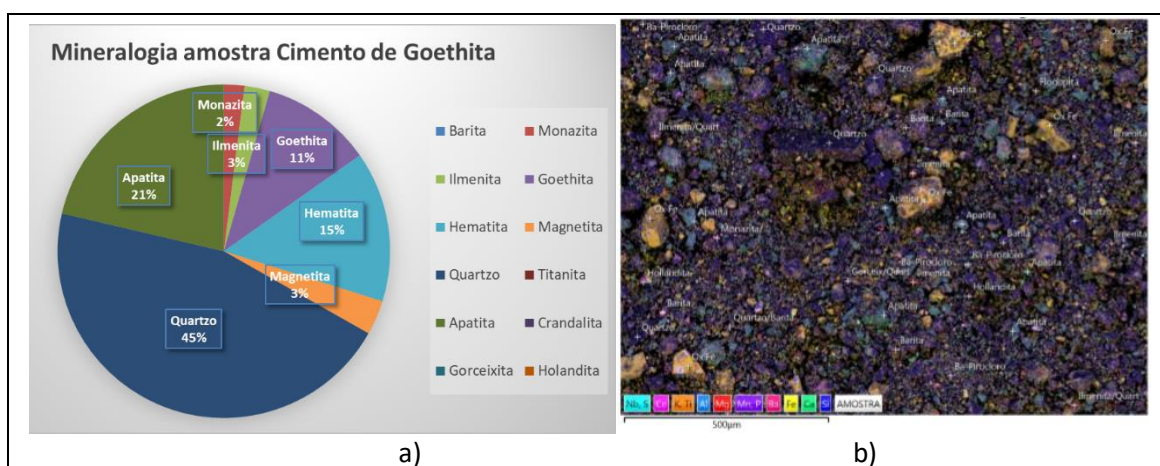


Figura 43. Caracterização mineralógica da amostra Cimento de Goethita. (a) análise quantitativa pelo método de Rietveld. (b) Mapa composicional obtido por EDS da imagem MEV: imagem global.

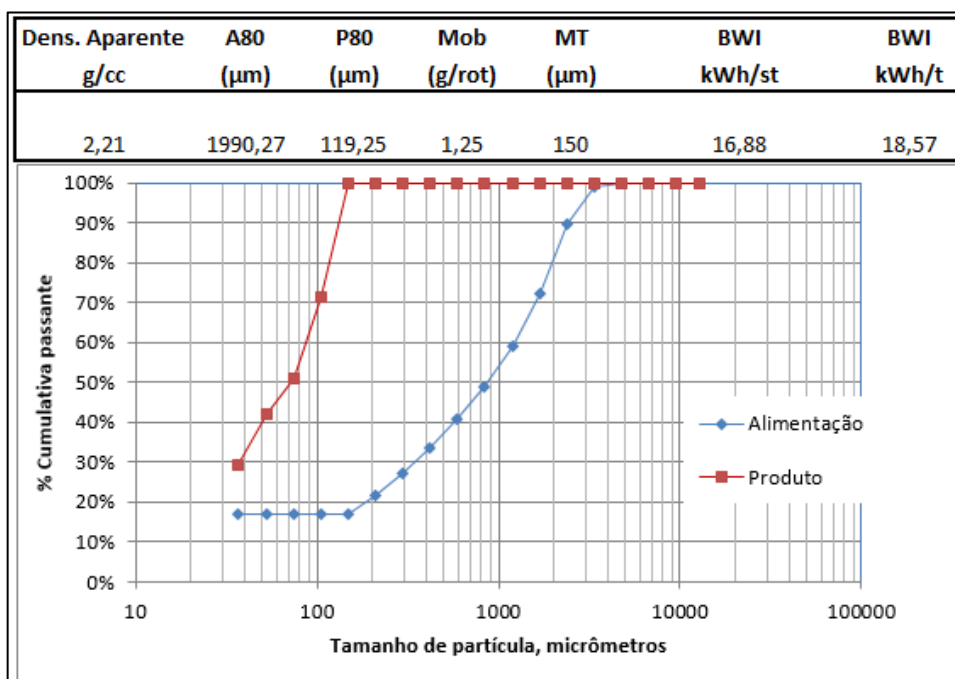


Figura 44. Análise de BWI de Bond, moinho de bolas, para a amostra de Cimento de Goethita.

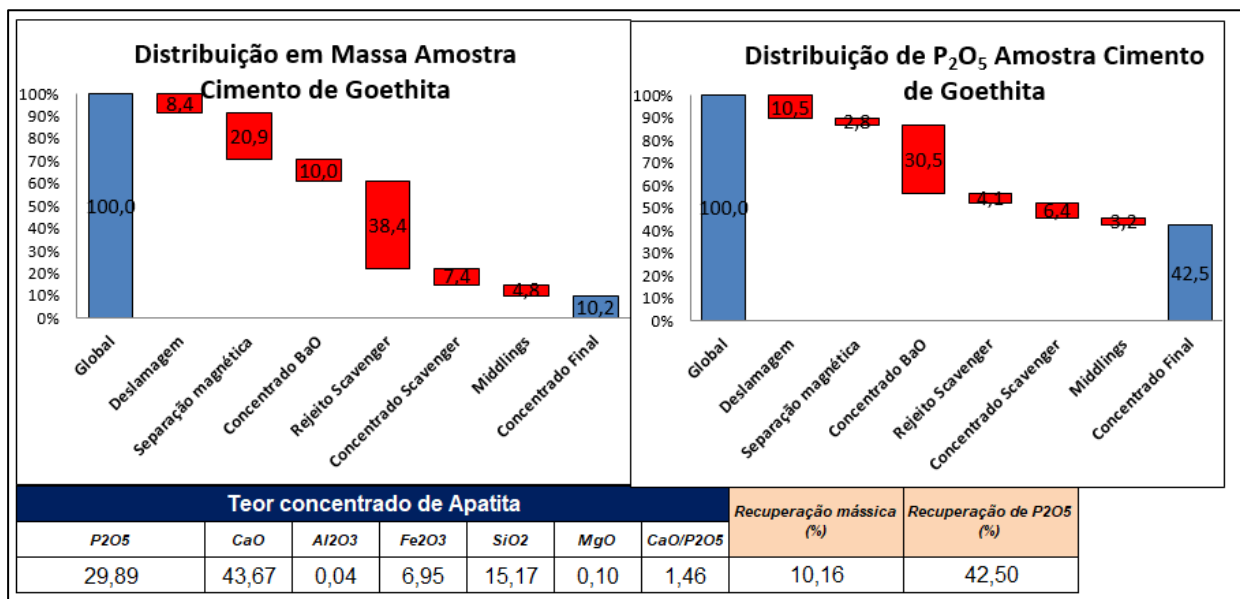


Figura 45. Distribuição em massa e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por etapa do teste batch padrão PCT 13.001.05 e qualidade do concentrado de apatita obtido para a amostra de Cimento de Goethita.

A amostra de Cimento de Goethita é uma amostra que deve indicar um procedimento mais resistente às operações de cominuição, devido seu valor de WI de 18,57 kWh/t, fator que deve resultar em redução de taxa horária e conseqüente afetar em redução da produtividade das Usinas. Trata-se de uma amostra que não apresentou resultados satisfatórios em eficiência, 10,16% de recuperação mássica e 42,5% de recuperação metalúrgica, adicionado ao não atendimento a qualidade especificada na Tabela 5.I. 29,89% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 6,95% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 15,17% de SiO<sub>2</sub> no concentrado final de apatita.

#### 5.10. Testes de Flotação em Bancada com Adição Percentual dos Cimentos mais Presentes no Depósito

Na figura 46 é apresentado o mapa composicional da presença e tipos de cimentos na mina do Complexo Chapadão:



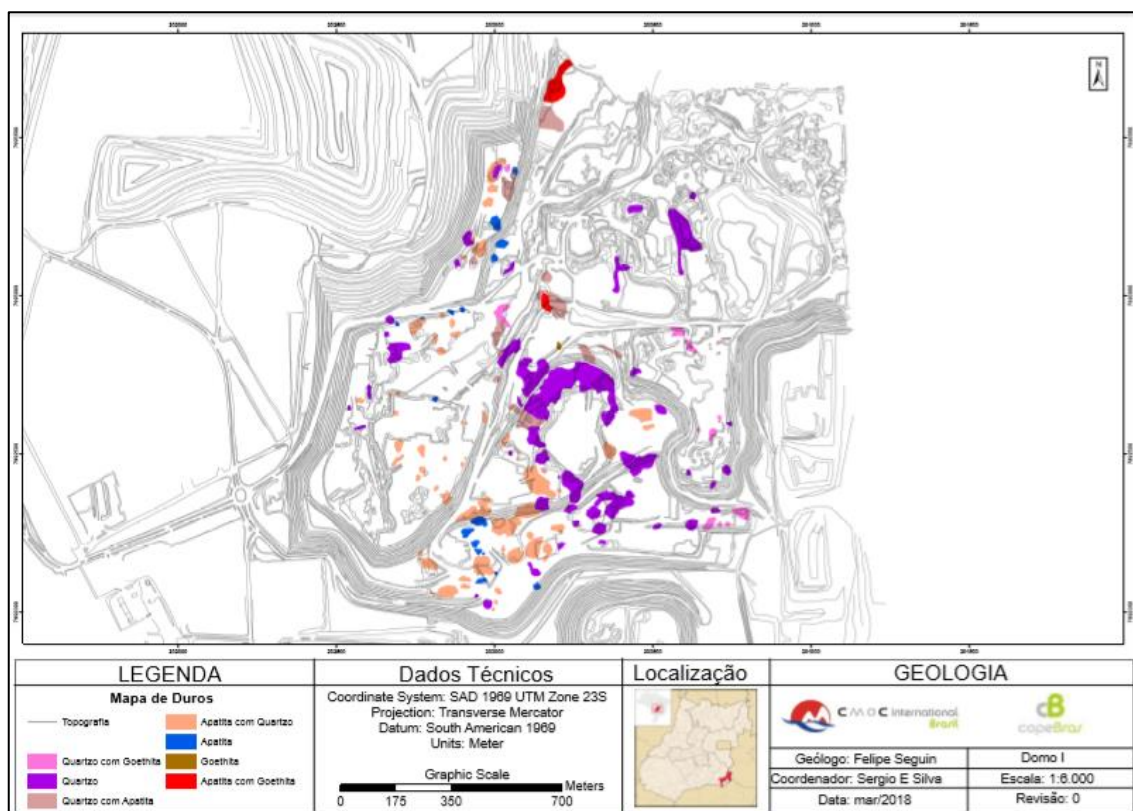


Figura 46. Mapa da localização dos materiais duros cimentados na mina Chapadão.

Os cimentos mais presentes na mina por ordem de predominância são: os cimentos de quartzo, os cimentos de apatita com quartzo, cimento de quartzo com apatita, cimento de quartzo com goethita, cimento de apatita, cimento de apatita com goethita e cimento de goethita.

Os testes de avaliação do impacto da adição percentual dos cimentos à pilha referência 80/2017 foram realizados apenas para os cimentos de apatita, apatita com quartzo, quartzo e quartzo com goethita.

Na figura 47 têm-se os resultados de eficiência: recuperação mássica e metalúrgica (a) e de qualidade do concentrado final de apatita (b) encontrados nos testes padrão para as amostras dos cimentos utilizados nesse estudo especificadamente analisados separadamente.

O Cimento de Quartzo apresentou o menor desempenho em recuperação entre os demais, a amostra de Cimento de Quartzo com Goethita demonstrou baixa seletividade, não atendendo a especificação da Tabela 5.I. O concentrado do Cimento de Quartzo também não atendeu aos limites especificados na Tabela 5.I. Os cimentos de Apatita e de Apatita com Quartzo apresentam recuperações mássicas superiores a 80% e recuperações metalúrgicas

superiores a 89%, apresentando ainda resultados de teor de  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado com qualidade mais elevada do que o especificado na Tabela 5.1.

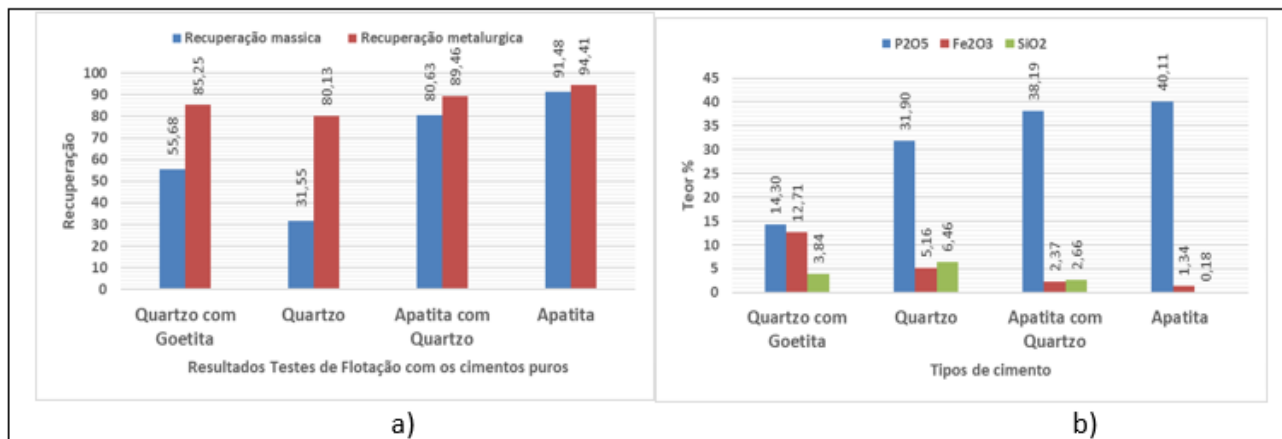


Figura 47. Teste de flotação padrão nos Cimentos sem Blends a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado final de apatita.

- Testes com adição de Cimento de Quartzo ao blend referência pilha 80/2017

O teste padrão com a adição percentual da amostra de cimento de quartzo à pilha referência 80/2017, figura 48, indica que com o aumento do incremento de Cimento de Quartzo à pilha referência a eficiência da flotação de apatita reduz significativamente somado o impacto negativo na qualidade do concentrado final.

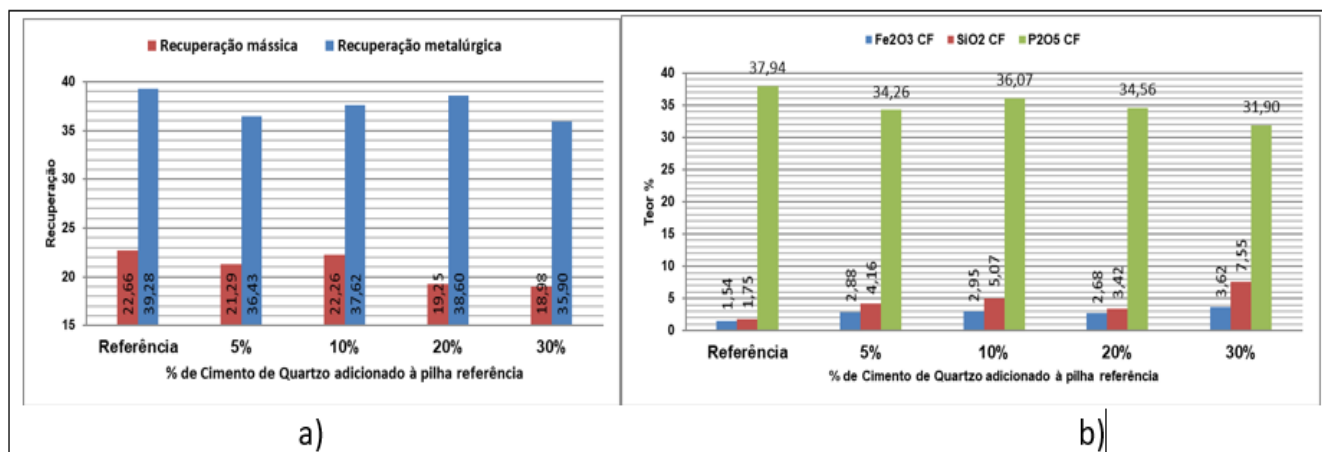


Figura 48. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Quartzo à pilha Referência: a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado final de apatita.

○ Testes com adição de Cimento de Quartzo com Goethita ao blend referência pilha 80/2017

O teste padrão com a adição percentual da amostra de cimento de quartzo com goethita à pilha referência 80/2017, figura 49, indica que o acréscimo de Cimento de Quartzo com Goethita causa baixa seletividade na flotação, resultando em não adequação da qualidade do concentrado de apatita especificada, condição ainda pior se comparado à adição Cimento de Quartzo ao blend.

É importante ressaltar que a adição de até 5% do cimento de quartzo com goethita ao blend atendeu a recuperação mássica e metalúrgica praticada nas usinas e também em qualidade do no que se refere a teor de  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado de apatita:

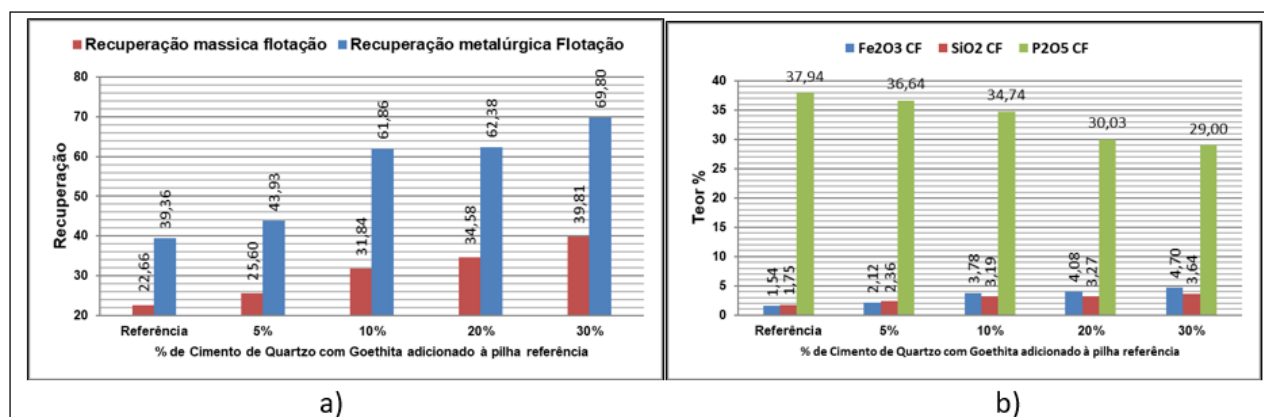


Figura 49. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Quartzo com Goethita à pilha Referência: a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado final de apatita.

○ Testes com adição de Cimento de Apatita ao blend referência pilha 80/2017

O teste padrão com as amostras de cimento de apatita, figura 50, indicam uma contribuição positiva ao resultado da flotação. A medida que o percentual desse tipo de cimento aumenta no blend, o impacto na flotação é observado através da tendência ascendente positiva para os resultados de recuperação.

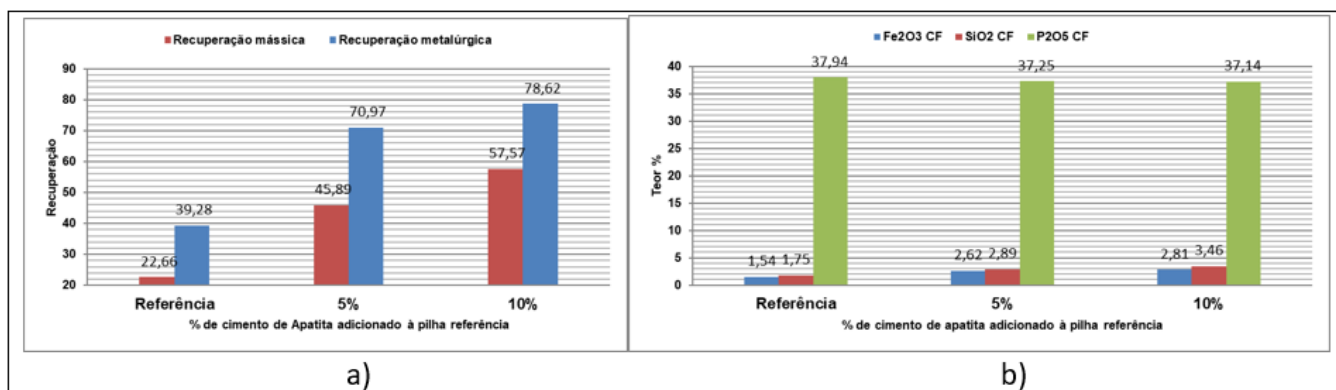


Figura 50. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Apatita à pilha 80/2017 a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> no concentrado final de apatita.

- Testes com adição de Cimento de Apatita com Quartzo ao blend referência pilha 80/2017

O teste padrão com a adição percentual da amostra de cimento de apatita, figura 51, indica que esse cimento contribui positivamente sob o processo de flotação nas condições padrão. À medida que o percentual desse tipo de cimento é incrementado no blend, observa-se comportamento ascendente positivo para os resultados de recuperação.

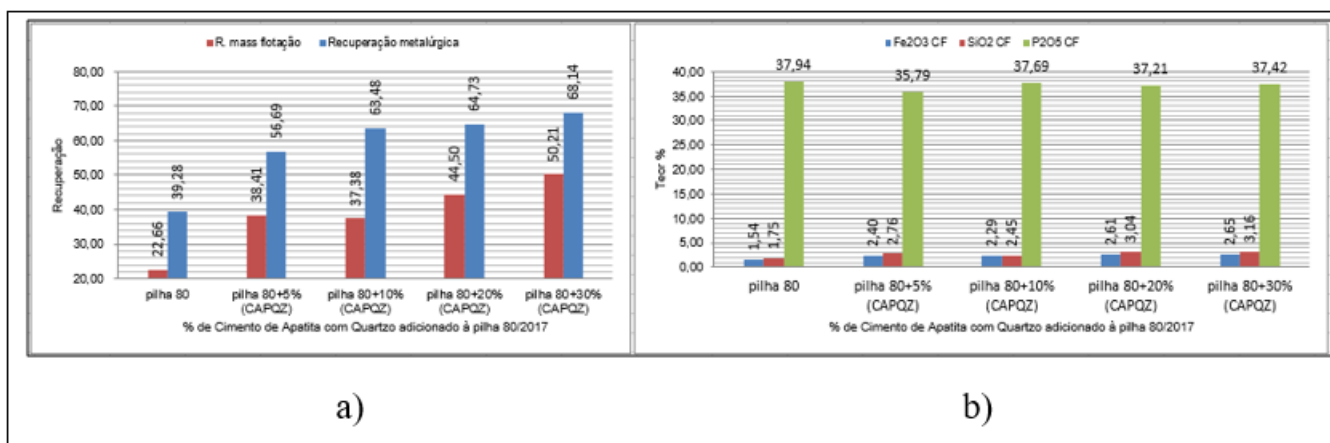


Figura 51. Teste de flotação padrão com a adição de Cimento de Apatita com Quartzo à pilha 80/2017 a) recuperação mássica e metalúrgica b) teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> no concentrado final de apatita.

O Cimento de Quartzo juntamente com o Cimento de Quartzo com Goethita nas condições padrão de processamento influenciam na redução de recuperação mássica e metalúrgica, assim como na menor qualidade do concentrado de apatita produzido, causando baixa seletividade e flotabilidade das amostras sob as condições de processo padrão.

Os cimentos de Apatita e de Apatita com Quartzo, por outro lado, contribuem positivamente no processo de flotação em condições normais de processamento, indicando que se tratam de amostras com melhor flotabilidade e seletividade na flotação.

Tabela 5.II. – Quadro Geral da caracterização tecnológica.

Amostras Cimentos	pilha 80/2017	Cimento de Quartzo	Cimento de Goethita	Cimento de Quartzo com Goethita	Cimento de Apatita com Goethita	Cimento de Apatita	Cimento de Apatita com Quartzo	Cimento de Quartzo com Apatita
Teor de P2O5	14,87	10,88	6,71	7,08	14,26	27,75	20,18	15,23
Teor de Fe2O3	34,81	11,62	28,29	36,48	56,74	25,62	40,44	50,04
Teor de SiO2	17,35	54,09	48,61	18,28	4,5	0,85	5,6	8,21
Teor MgO	1,23	0,1	0,25	0,01	1,07	1,23	1,07	1,78
CaO/P2O5	1,27	1,30	1,26	1,05	1,37	1,34	1,34	1,33
% Apatita	37,42	32,1	21,07	19,77	34,83	72,52	51,25	46,64
% Magnetita	7,24	0,53	3,3	0,88	18,49	6,27	25,26	33,8
% Hematita	13,94	4,89	14,41	6,21	26,01	10,21	10,92	4,9
% Goethita	9,4	5,5	10,64	19,72	9,69	3,82	2,63	3,45
% Quartzo	19,07	49,33	44,84	19,26	6,5	1,87	7,39	7,84
WI de Bond (kWh/t)	17,18	20,27	18,57	6,8	14,11	9,98	12,05	14,75
Recuperação Mássica Flotação	26,07	15,44	10,2	27,1	13,1	38,11	25,39	26,9
Recuperação Metalúrgica Flotação	59,95	43,9	42,5	69,4	23,3	54,1	47	42,1
Teor P2O5 Concentrado final	34,23	30,04	29,89	19,64	34,62	39,7	37,05	37,21
Teor Fe2O3 Concentrado final	5,91	5,87	6,95	25,08	8,26	2,21	2,68	2,67
Teor SiO2 Concentrado final	5,98	11,58	15,17	7,67	3,62	0,5	3,97	5,54
Teor MgO Concentrado final	0,33	0,15	0,1	0,07	0,11	0,05	0,04	0,05
CaO/P2O5 Concentrado Final	1,29	1,48	1,46	1,16	1,41	1,32	1,38	1,38

## 6. CONCLUSÃO

Através do estudo concluiu-se que as amostras dos cimentos estudados neste trabalho apresentam comportamento diferentes em relação a desempenho na flotação e resistência a cominuição. Para algumas amostras foi observado ainda, diferenças das características de liberação da apatita em relação à faixa de tamanho.

As amostras de cimento de apatita, cimento de quartzo com apatita e cimento de apatita com quartzo podem ser agrupadas como um grupo de amostras a ser classificadas como atendem nas condições normais do processo de flotação e que respondem satisfatoriamente a este processo, visto que alcançam resultados de recuperação próximos ao praticado nas usinas e a qualidade é facilmente atendida para os óxidos de  $P_2O_5$  e  $Fe_2O_3$ , salvo o teor de  $SiO_2$  nas amostras de cimento de quartzo com apatita (5,54%) e de apatita com quartzo (3,97%).

A amostra de cimento de quartzo apresentou alguns comportamentos interessantes para os índices técnicos analisados: 88% da apatita liberada se apresenta entre os tamanhos 105 $\mu$ m e 55 $\mu$ m, tamanho inferior às condições de P80, 130 $\mu$ m, obtidas no processo de classificação e moagem de bolas sob carga circulante fechada do processo de beneficiamento do Complexo Chapadão. Além disso, o valor de WI de Bond obtido dessa amostra foi o maior entre todas as amostras estudadas neste trabalho, 20,27 kWh/t, que representa um material de alto custo de processamento, e significativo potencial em redução de produtividade de concentrado de apatita, isto, somado ao desempenho negativo no processo de flotação em recuperação e qualidade, indicou tanto no teste com a amostra individual, como também no teste onde o mesmo foi acrescido percentualmente no blend referência, redução de recuperação e qualidade de concentrado de apatita obtido no processamento, não atendendo à especificação da qualidade exigida pelas unidades de produção de fertilizantes.

Com base nas observações do estudo para a amostra de cimento de quartzo especificadamente, não é aconselhável considerar este cimento como minério, pois o mesmo não representa economicidade nas condições atuais de processamento. Pode ser, que em outras condições de demanda e oferta, bem como condições de preço de venda de fertilizantes no futuro, seja possível aproveitá-lo e para isso é preciso que se estude outras alternativas para aproveitamento com diferentes condições de processamento.

O Cimento de Quartzo com Goethita demonstrou que nem mesmo as partículas mais finas dessa amostra podem obter grau de liberação superior a 67%, entre os tamanhos 215 $\mu$ m e 74

um é que se observou o maior percentual de apatita liberada, que variou entre 60% e 67%, não se trata de uma amostra desafiadora no que diz respeito a resistência à moagem, pois apresentou valor de WI de Bond expressivamente baixo, 6,8 kWh/t, sendo que o principal aspecto observado, é que em condições padrões de processamento na etapa de flotação obteve teores de  $P_2O_5$  e  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$  no concentrado de apatita muito aquém do especificado na tabela 5.I. O teste de flotação com adição incremental do cimento de quartzo com goethita ao blend referência, pilha 80/2017 indicou, especificamente para esse blend, que a adição de até 5% desse tipo de cimento contribuiu em acréscimo de recuperação mássica e metalúrgica, atendendo aos teores especificados para concentrado de apatita.

As amostras de cimento de goethita e de cimento de apatita com goethita devem influenciar em menor recuperação ao blend, conseqüentemente impactando a produtividade das usinas de concentração de fosfato do Complexo, as amostras apresentaram recuperações mássicas baixas: 10,16% para o cimento de goethita e 13,27% para o cimento de apatita com goethita. A amostra de cimento de goethita apresentou teor de  $P_2O_5$  menor entre as demais, 6,71% e comportamento na flotação insatisfatório, visto que obteve menor recuperação mássica nas condições de teste de flotação padrão, 10,16% de recuperação mássica, e teores de 29,89% de  $P_2O_5$ , 6,95% de  $Fe_2O_3$  e de 15,17% de  $SiO_2$  no concentrado de apatita, não atendendo a especificação de qualidade. Além disso, a amostra de cimento de goethita apresentou valor de WI de Bond elevado se comparado as condições usuais de processamento das usinas atuais, 18,57 kWh/t na amostra de cimento de goethita contra 14 kWh/t médio praticado nas usinas. Atualmente, as condições obtidas em recuperação e teor de alimentação dessa amostra, a desclassificam como minério.

A amostra de cimento de apatita com goethita, assim como a amostra de cimento de goethita, obteve baixa recuperação mássica 13,27% e metalúrgica 23,3% e não atendem às especificações sobre o concentrado de apatita produzido. O teor de  $P_2O_5$  dessa amostra, de 7,08%, somado a baixa eficiência também a desclassificam como minério nas condições de mercado atual.

As discussões sobre classificação de minério em relação à economicidade envolvem um trabalho ainda maior, explorando a mina em profundidade e área e abrangendo amostras de diferentes litologias, localização e perfil intempérico, o trabalho precisa de maior abrangência e chama atenção para a importância da geometalurgia na cadeia produtiva como um todo: da mina ao fertilizante utilizado como insumo agrícola.



## 7. Contribuições do trabalho

Em maio de 2018 foi realizado um workshop na empresa com a participação do time técnico de mina, geologia, produção, controle de processos, desenvolvimento de processos e *business improvement*. O motivo do trabalho foi em razão das dificuldades em atender o orçamento de produção de concentrado de apatita do ano em função do “throughput” reduzido na alimentação das usinas.

Na figura 52 é possível visualizar que a tendência de produção somada das usinas era de 3.934 t/dia contra um orçamento de 4.400 t/dia, e o principal fator contribuinte para esse resultado naquele momento era a redução de cerca 124 t/h na capacidade de alimentação das usinas.

Vários trabalhos foram desenvolvidos e ações foram realizadas para buscar alimentação das usinas planejada. Um dos fatores mais relevantes e que mais influenciaram a adequação do throughput foi a decisão gerencial de não considerar a adição de cimento de quartzo no blend das pilhas.

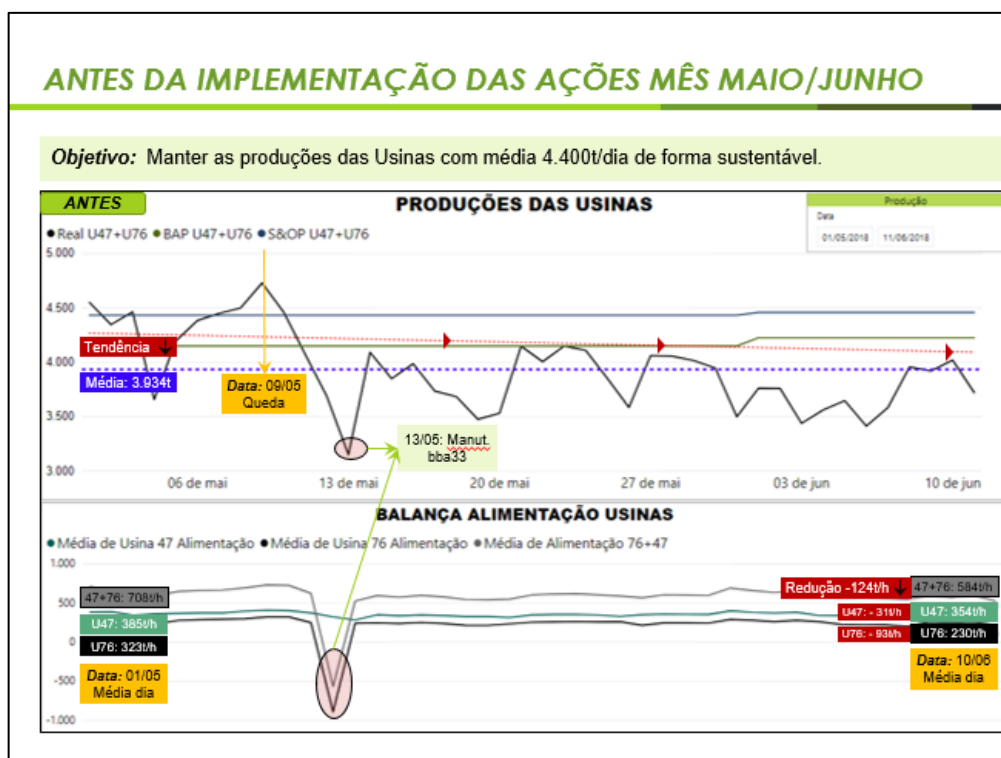


Figura 52. Tendência de alimentação e produção em t/h das usinas antes do workshop.

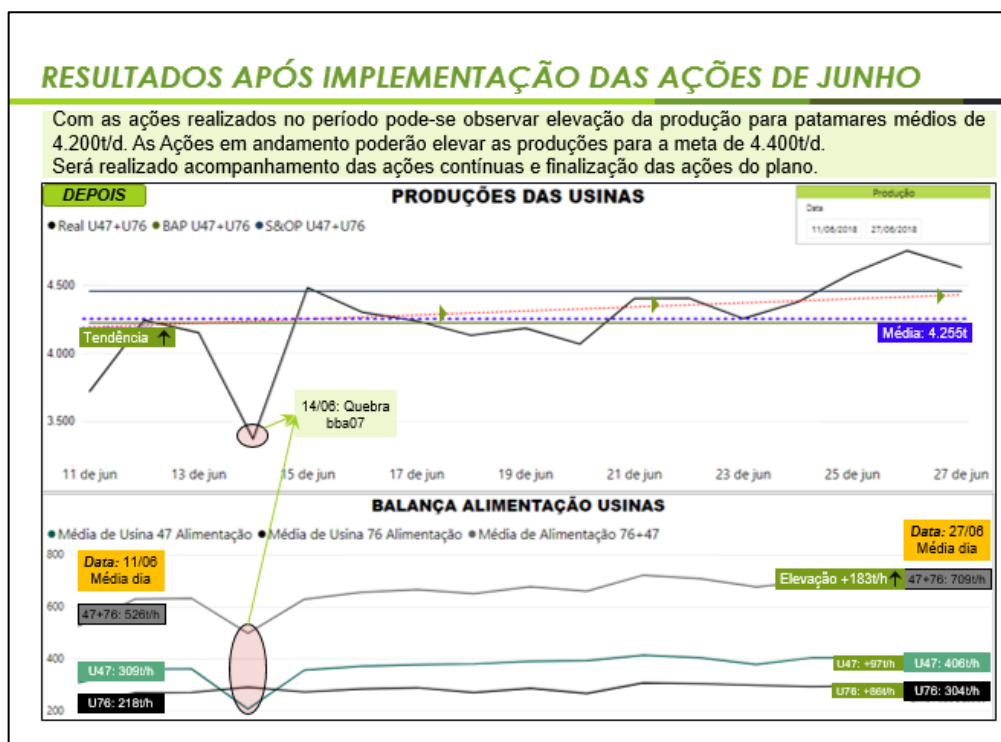


Figura 53. Tendência de alimentação e produção em t/h das usinas depois do workshop.

A retirada do cimento de quartzo na composição dos blends a partir de junho de 2018 possibilitou retomar melhores condições de alimentação em t/h nas usinas e os resultados prévios obtidos até então com o presente trabalho foram essenciais para suportar a tomada de decisão.

Até então existiam indicativos e comportamentos operacionais observados na usina que sinalizavam que a adição desse material não acrescentava positivamente no resultado do blend alimentado, havia ainda o impacto em desgaste de barras no britador, maior desgaste de peças dos equipamentos das usinas, o que não foi avaliado neste trabalho.

### 7.1. Sugestão para trabalhos futuros

- 1) Para a amostra de Cimento de Quartzo: como esta amostra apresentou dois perfis de liberação de apatita por faixa granulométrica: 88% de apatita não associada na faixa de tamanho entre 74 e 55 $\mu$ m e 66,8% de apatita não associada na faixa de tamanho entre 149 $\mu$ m e 105 $\mu$ m, propõe-se realizar uma caracterização similar a realizada neste trabalho, cominuindo a amostra de cimento de quartzo em P80 de 74 $\mu$ m;

- 2) Para amostra de Cimento de Quartzo com Goethita: avaliar o estudo da adição percentual desse cimento em outros blends da Usina, a fim de comprovar se o limite máximo de 5% em relação ao blend é seguro em flotabilidade e seletividade;
- 3) Estudo para aproveitamento dos cimentos de quartzo, quartzo com goethita, goethita e de apatita com goethita para rota de termofosfatos;
- 4) Estudo de liberação e processamento na flotação, adição incremental para os cimentos de goethita e de apatita com goethita;
- 5) Fazer um estudo de caracterização tecnológica mais amplo, em diversas localidades, perfis intempéricos e litologias dos tipos de cimentos presentes na Mina.

## REFERÊNCIAS

ABNT MB 3253. Moinho de Bolas - **Determinação do índice de trabalho**. Rio de Janeiro, Brasil, 1990.

ALSAFASFEH, A.; ALAGHA, L., **Recovery of Phosphate Minerals from Plant Tailings Using Direct Froth Flotation**. *Minerals*. v. 7, n. 8, p. 145, 2017.

ANDA. Disponível em: <<http://anda.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 8 jul. 2019.

ATKINS, P.; JONES, L., **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 2012.

AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R.; LUCKIE, P.T., **Process Engineering of Size reduction: Ball Milling**. New York, 1984.

BARROS, L. A. F., **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIO FOSFÁTICO DE SALITRE PATROCÍNIO - MG**. 2005. 446 f. UFMG, 2005.

BARROS, L.; FERREIRA, E.; PERES, A., **Floatability of apatites and gangue minerals of an igneous phosphate ore**. v. 21, p. 994–999, 2008.

BRAGA, S. A.; COSTA, J. F. C. L., **KRIGAGEM DOS INDICADORES APLICADA A MODELAGEM DAS TIPOLOGIAS DE MINÉRIO FOSFATADOS DA MINA F4**. HOLOS, 2016.

BEZERRA, M.; MONTE, M., **Química de Superfície na Flotação**. Rio de Janeiro, 2010.

- CHAVES, A.P., **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - A Flotação no Brasil**. 2. ed., 2009.
- DAR, S.; KHAN, K.; BIRCH, W. **Sedimentary: Phosphates**. [S.l.]: Elsevier Inc., 2017.
- EBADNEJAD, A. **Investigating of the effect of ore work index and particle size on the grinding modeling of some copper sulphide ores**. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 5, n. 2, p. 101–110, 2016.
- FAO. **World Fertilizer Trends and Outlook to 2018**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2019.
- FERRETTI, M.; TIRELLO, R. **Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais**. *Revista CPC*, v. 0, n. 7, p. 74, 2014.
- FIorentini, J. A.; **Avaliação da Durabilidade, Abrasividade e Dureza das Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral**. Porto Alegre, 2002.
- FUCOTEAUX, R.; LUCAS, J., **Chapter 9 Weathering of Phosphate Minerals**. v. 3, p. 292-317, n. Fisher 1973, 1984.
- GASPAR, José Carlos. **Caracterização dos Materiais Duros**. Empresa Interessada: Copebrás. 2017.

GIBSON, S.; THOMPSON, R.; LEONARDOS, O.; DICKIN, A.; MITCHELL, J., **The late cretaceous impact of the trindade mantle plume: Evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil.** *Journal of Petrology*, v. 36, n. 1, p. 189–229, 1995.

GONTIJO, V. L.; SANTOS, L. H., **MÉTODO ALTERNATIVO PARA PURIFICAÇÃO DE P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> DO MINÉRIO FOSFÁTICO SÍLICO-CARBONATADO DA REGIÃO DE ARAXÁ, NA RETIRADA DE ÍONS CÁLCIO E MAGNÉSIO VIA SISTEMA AQUOSO BIFÁSICO (SAB).** HOLOS, 2017.

HENRIQUES, A. B., **Caracterização e Estudo das Propriedades Eletrocinéticas dos Minerais de Ferro: Hematita, Goethita e Magnetita.** Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

HERNÁNDEZ, E. A., **Reflectance and Emissivity Spectroscopy of Igneous and Sedimentary Phosphate Rocks From Midwestern Brazil: Case Study of the Catalão I (Go), Tapira (Mg), Rocinha E Lagamar (Mg) Deposits.** Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências, 2013.

HOLTAN, H.; KAMP-NIELSEN, L.; STUANES, A. O., **Phosphorus in soil, water and sediment: an overview.** *Hydrobiologia*, v. 170, n. 1, p. 19–34, 1988.

IMB, **Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos** – Governo do Estado de Goiás. Disponível em: < <http://www.imb.go.gov.br/>>. Acesso em: 30 Jul. 2019.

IMBERNON, R., **Evolução Geoquímica e Mineralógica dos Produtos de Alteração Intempérica sobre as rochas do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, Goiás.** São Paulo, 1993.

LENHARO, S.L.R., **Caracterização Mineralógica/Tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato.** Universidade de São Paulo, 1994.

LENHARO, S. L. R.; MOURA, A.; BOTELHO, N. F., **Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: examples from Pitinga and Goiás, Brazil.** v. 119, p. 7, 2000.

LOUREIRO, F.E.L; MONTE, M.B.M; NASCIMENTO, M., **Fosfato. Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações.** p. 141–172, Rio de Janeiro, 2005.

LOUREIRO, F. E. L.; MELAMED, R., **O fósforo na agroindústria brasileira. Fertilizantes agroindústria & sustentabilidade.** p. 655, 2008.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M., **Agrominerais – Fosfato.** p. 40, 2008.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A., **Tratamento de minérios.** Rio de Janeiro, 2010.

MAGDALINOVIC, N., **A Procedure for Rapid Determination of the Bond Work Index.** International Journal of Mineral Processing, p. 125-132, Amsterdam, 1989.

MATIOLO, E.; COUTO, H.J.B.; TEIXEIRA, M.F.L.; ALMEIDA, R.N.; FREITAS, A.S., **A Comparative Study of Different Columns Sizes for Ultrafine Apatite Flotation.** 2019.

MATIOLO, E.; COUTO, H.J.B.; TEIXEIRA, M.F.L; FREITAS, A.S.; ALMEIDA, R.N., **Recovery of apatite from slimes of a Brazilian phosphate ore.** Journal of Wuhan Institute of Technology, v. 39, p. 39–48, 2017.

MONTE, M.B.M. ; CLARK, A.E., **QUÍMICA DE SUPERFÍCIE NA FLOTAÇÃO. Tratamento de Minérios.** 2002.

- NAPIER-MUNN, T.; WILLS, B. A., **Wills' Mineral Processing Technology**. Canadá, 2005.
- NATHAN, Y., **Chapter 8 The Mineralogy and Geochemistry of Phosphorites**. p.275-291, 1984.
- OLIVEIRA, B.; IMBERNON, L., **Weathering alteration and related REE concentration in the Catalao I carbonatite complex, central Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, n. 4, p. 379–388, 1998.
- PROCHNOW, L.I., **Fertilizantes fosfatados: algumas crenças e alguns fatos científicos**. p. 1–3, Piracicaba, 2001.
- RIBEIRO, Carlos Cordeiro. **Geologia, geometalurgia, controles e genese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO**. Tese - UnB, p. 473, 2008.
- SANTANA, R. C.; FARNESE, A.C.C.; FORTES, M.C.B.; ATAÍDE, C.H.; BARROZO, M.A.S., **Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation**. *Separation and Purification Technology*, v. 64, n. 1, p. 8–15, 2008.
- SEGUIN, F., **Tipo de cimentação em materiais duros do perfil de alteração da mina de fosfato da Anglo American, Catalão-GO**. IGCE. Rio Claro, SP, 2015.
- SEGURA, E. P.; GASPAR, J. C.; BROWN, F., **La Geometalurgia : Una Excelente Herramienta Multidisciplinaria Para La Vinculación Universidad-Industria**. *Epistemus*, p. 73–76, 2013.



SIVAMOHAN, R., **The problem of recovering very fine particles in mineral processing - A review.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 28, n. 3–4, p. 247–288, 1990.

SILVA, A.A.M., **O PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DA APATITA.** UFU, 2005.

TAKEHARA, L., **Caracterização Geometalúrgica dos Principais Minérios de Ferro Brasileiros - Fração Sinter Feed.** Instituto de Geociências, p. 421, 2004.

TASSINARI, M. M.L.; KAHN, H.; RATTI, G. **Process mineralogy studies of Corrego do Garimpo REE ore, Catalao-I alkaline complex, Goias, Brazil.** *Minerals Engineering*, v. 14, n. 12, p. 1609–1617, 2001.

TOLEDO, M.C.M.; LENHARO, S.L.R.; FERRARI, V.C.; FONTAN, F.; PARSEVAL, P.; LEROY, G., **The Compositional Evolution of Apatite in the Weathering Profile of the Catalão I Alkaline-Carbonatitic Complex , Goias , Brazil.** v. 42, n. October, p. 1139–1158, 2018.

TOLEDO, M.C.M.; PEREIRA, V.P., **A VARIABILIDADE DE COMPOSIÇÃO DA APATITA ASSOCIADA A CARBONATITOS.** *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, v. 22, n. 112, p. 27–64, 2001.

ULIANA, D.; KAHN, H.; BRAZ, A. B., **Caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do Complexo Alcalino de Salitre, MG - Área Fosfertil.** *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 4, p. 511–516, 2010.

WILLIAMS, S. R.; RICHARDSON, J. M., **Geometallurgical mapping: a new approach that reduces technical risk geometallurgical mapping.** *Sgs Minerals Services*, p. 1–13, 2004.

ZHANG, P.; MILLER, J. D.; EL-SHALL, H., **Beneficiation of phosphates : new thought, new technology, new development.** 2012.