


Avaliação do aproveitamento do titânio contido nos minérios de nióbio da região de Catalão

Fernando Rodrigues da Cunha ¹
André Carlos Silva ^{2*} 

Resumo

Os minérios de nióbio beneficiados na região de Catalão/GO contêm ilmenita e outros minerais de titânio que se concentram na etapa de flotação de pirocloro, dificultando o processo produtivo e contaminando o produto. A ilmenita, mais abundante e principal mineral-minério de titânio, é matéria-prima para a produção de rutilo sintético, escória de titânio e liga FeTi. Mais de 90% da produção mundial de titânio é direcionada para produção de dióxido de titânio, no entanto o processo aluminotérmico de produção de liga FeTi, possui as vantagens de ser adaptável a concentrados mais pobres, produzir metal livre de U e Th e ser uma tecnologia já bem estabelecida em Catalão para produção do FeNb. O mercado de FeTi existe, inclusive com empresas comercializando no Brasil. A avaliação inicial do aproveitamento da ilmenita dos minérios de nióbio para produção da liga FeTi mostrou potencial para faturamento anual de até US\$ 96 milhões, mas são necessárias mais análises de grau de liberação e teor da ilmenita, além de ensaios de concentração em bancada e/ou piloto.

Palavras-chave: Ilmenita; FeTi; Nióbio; Titânio.

Evaluation of the recovery of titanium contained in the niobium ores from Catalão region

Abstract

The niobium ores processed in the region of Catalão/GO contain ilmenite and other titanium bearing minerals that concentrate on the pyrochlore flotation stage, making difficult the production process and contaminating the final product. Ilmenite, the most abundant and main titanium bearing mineral is the raw material for the synthetic rutile production, titanium slag, and FeTi alloy. More than 90% of the world's titanium production is used in the titanium dioxide production. However, the aluminothermy process used to produce FeTi alloy has the advantages of being adaptable to lower grade concentrates, producing a metallic alloy free of U and Th, a procedure well established in Catalão for FeNb alloy production. The FeTi market exists with companies trading in Brazil. The initial evaluation of the ilmenite recovery from the niobium ores to produce FeTi alloy showed potential for annual revenues of up to US\$ 96 million. However, further mineral liberation analysis and ilmenite grade is required, as well as concentration tests in bench and/or pilot scale.

Keywords: Ilmenite; FeTi; Niobium; Titanium.

1 Introdução

A Niobras, empresa do grupo China Molybdenum (CMOC Brasil), é atualmente o segundo maior produtor mundial de liga ferronióbio (FeNb), com uma produção média de 9 kt Nb/ano. Situada entre os municípios de Catalão e Ouidor, no estado de Goiás, teve a sua operação iniciada nos anos 70, com o início da produção do concentrado de pirocloro (mineral-minério de nióbio) em 1976 e da produção

de liga FeNb em 1977. Na época o desenvolvimento do processo aluminotérmico se fez essencial, tendo em vista que o concentrado de nióbio (Nb) produzido continha teores de urânio e tório que impediam sua exportação, o que não ocorre com a liga metálica produzida por este processo.

A lavra do minério de Nb foi iniciada pelas Minas I e II na região denominada Chapadão, fazendo divisa com

¹Laboratório de Modelamento e Processamento Mineral, Universidade Federal de Goiás – UFG, Catalão, GO, Brasil.

²Universidade Federal de Catalão – UFCAT, Catalão, GO, Brasil.

*Autor correspondente: ancarsil@ufcat.edu.br



as minas de fosfato. No final dos anos 90 e início de 2000, iniciou-se a operação da Mina Boa Vista, localizada no município de Catalão. Em 2008 teve início a operação da Planta *Tailings* (do inglês, rejeitos), que permitiu o aproveitamento do pirocloro contido nos rejeitos do processamento de rocha fosfática da Copebras (empresa pertencente ao grupo CMOC Brasil). Ao longo desses anos, as características do minério processado e, conseqüentemente, o processo produtivo, mudaram de acordo com o avanço da lavra e locais de jazimento. Contudo, os minerais portadores de titânio (Ti) sempre estiveram presentes no ROM (em inglês *Run of Mine*) como um contaminante do pirocloro.

Atualmente, a Niobras mantém três plantas de processamento mineral de Nb em operação, sendo elas a *Tailings*, a *Boa Vista Fresh Rock* (BVFR) e a *Boa Vista* (BV). As duas primeiras plantas processam minério oriundo da Mina Boa Vista. Contudo, a planta BV trabalha com minério das zonas oxidadas da mina e a planta BVFR com rocha fresca. O processo produtivo da liga FeNb na Niobras consiste basicamente nas seguintes etapas de lavra, processamento mineral e metalurgia. O processamento mineral é composto por britagem, separação magnética de baixa intensidade a seco (denominada localmente de escalpe), homogeneização, moagem primária e secundária (em circuito fechado com hidrociclones), separação magnética de baixa intensidade a úmido, deslamagem (hidrociclones) e flotação, que se divide em duas etapas de flotação reversa (flotação de carbonatos seguida pela flotação de silicatos) e uma direta de pirocloro. As etapas de metalurgia (hidro e piro) são compostas por lixiviação, calcinação e redução aluminotérmica. Ao final do processo a liga FeNb é submetida a uma etapa de britagem para adequação granulométrica do produto final, de onde o mesmo segue para embalagem e expedição. Os minerais portadores de Ti tendem a se concentrar na flotação de pirocloro, diminuindo o teor do concentrado final e dificultando o controle do processo aluminotérmico. Isto se deve ao fato de que as análises químicas de rotina (feitas por fluorescência de raios X) não permitem a identificação das fases minerais portadoras de Ti presente no concentrado final. Soma-se a isso o fato do modelo operacional (balanço de massas e energia) não estar preparado para essa entrada.

O Ti metálico e suas ligas possuem propriedades aplicáveis em tecnologias de ponta nas indústrias aeronáutica, espacial, naval, nuclear, química, automobilística, petróleo e gás, além de implantes, próteses e bens de consumo. No entanto, em 2004 95% da produção mundial de matérias-primas de Ti foi destinada à produção de pigmento de dióxido de Ti, que é um material de altos índice de refração e alvura, alto poder de cobertura, opacidade, inércia química e toxicidade nula. Assim sendo, atualmente o principal uso do Ti é como um pigmento branco para tintas e revestimentos, borracha, papel e enchimento de reforço em plásticos. TiO_2 também é usado em cerâmicas artificiais, tais como revestimentos para hastes de solda, como agregado pesado, fundentes de fornos de aço. Menos que 2% de todo Ti produzido é usado para a produção de Ti metálico e/ou suas ligas [1].

O Ti é utilizado na aciaria como redutor e elemento de liga, na forma de ferro-titânio (FeTi) ou sucata. Aços tratados com Ti, ou contendo certas quantidades dele, normalmente possuem melhores propriedades mecânicas como resultado da eficiente desgaseificação e distribuição uniforme das inclusões de enxofre [2].

Segundo Bedinger [3], os principais minerais de Ti são a ilmenita ($FeO.TiO_2$), o rutilo (TiO_2), o leucóxênio (que é um produto da alteração ou mistura de óxidos de Fe e Ti, incluindo titanita, ilmenita e perovskita, geralmente reconhecido como um rutilo ou anatásio em granulometria muito fina), o anatásio (TiO_2) e a perovskita ($CaTiO_3$), sendo que apenas os três primeiros minerais tem interesse econômico atualmente. Segundo Amorim e Almeida [4], a ilmenita é o mineral de Ti mais comum e abundante, sendo composto por até 53% de TiO_2 . Já o rutilo, de ocorrência menos comum que a ilmenita, é composto basicamente de TiO_2 , podendo conter até 10% de impurezas. No Brasil existem importantes ocorrências de anatásio, porém ainda sem nenhuma exploração industrial por falta de uma rota de processo economicamente viável para este mineral.

A Tabela 1 apresenta a estimativa de produções e reservas mundiais de ilmenita e rutilo por país (dados de 2018). Os recursos minerais mundiais de anatásio, ilmenita e rutilo quando combinados somam mais de 2 bilhões de toneladas [5]. É possível notar a predominância da disponibilidade da ilmenita como mineral minério de Ti. Os principais países produtores de ilmenita são Canadá, China, Austrália, Moçambique e África do Sul. Já os principais produtores de rutilo são Austrália, Serra Leoa, África do Sul, Ucrânia e Quênia. O Brasil detém aproximadamente 5% das reservas mundiais de ilmenita, porém apenas 1% da produção mundial.

A concentração de minerais portadores de Ti é geralmente realizada através de métodos gravíticos (ou densitários) e magnéticos (normalmente de alta intensidade). A ilmenita é frequentemente processada para a produção de escória sintética ou titanífera. Embora numerosas tecnologias sejam usadas para a produção de rutilo sintético, quase todas são baseadas em lixiviação seletiva ou redução térmica de Fe e outras impurezas presentes na ilmenita [3].

A flotação pode ser usada para a concentração de partículas finas, naturais ou não, atuando em faixas granulométricas inadequadas para os métodos anteriormente citados. A flotação da ilmenita e dos minerais oxidados de Fe pode ser realizada utilizando coletores carboxílicos (ácidos graxos e seus sabões), sulfonatos e aminas (tipicamente em pH acima do ponto isoelétrico do mineral a ser flotado) [6]. Contudo, ilmenita é caracterizada por apresentar baixa flotabilidade, resultando em baixas recuperação (máscica e/ou metalúrgica) [7,8].

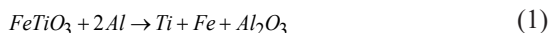
A liga FeTi pode ser produzida industrialmente por refusão de materiais reciclados, produzindo ligas de teores mais altos (por exemplo, 70Ti-30Fe), ou pela redução aluminotérmica da ilmenita, produzindo ligas de teores mais baixos (por exemplo, 25Ti-75Fe). Concentrados de ilmenita com 42% de TiO_2 são suficientes para produção

Tabela 1. Estimativa de produções e reservas mundiais de ilmenita e rutilo em 2018 [5]

Países	Produção				Reservas			
	Ilmenita		Rutilo		Ilmenita		Rutilo	
	(10 ³ t)	(%)	(10 ³ t)	(%)	(10 ³ t)	(%)	(10 ³ t)	(%)
África do Sul	500	9,3	100	13,3	63.000	7,2	8.300	13,4
Austrália	700	13,0	250	33,3	250.000	28,4	29.000	46,8
Brasil	50	0,9	-	-	43.000	4,9	-	-
Canadá	850	15,7	-	-	31.000	3,5	-	-
China	850	15,7	-	-	230.000	26,1	-	-
Estados Unidos ⁽¹⁾	100 ⁽²⁾	1,9	(²)	(²)	2.000 ⁽²⁾	0,2	(²)	(²)
Índia	300	5,6	10	1,3	85.000	9,7	7.400	11,9
Quênia	280	5,2	90	12,0	54.000	6,1	13.000	21,0
Madagascar	100	1,9	-	-	40.000	4,5	-	-
Moçambique	600	11,1	8	1,1	14.000	1,6	880	1,4
Noruega	200	3,7	-	-	37.000	4,2	-	-
Serra Leoa	-	-	170	22,7	-	-	490	0,8
Senegal	250	4,6	8	1,1	ND	-	ND	-
Ucrânia	230	4,3	100	13,3	5.900	0,7	2.500	4,0
Vietnã	200	3,7	-	-	1.600	0,2	-	-
Outros países	150	2,8	10	1,3	26.000	3,0	400	0,6
Mundo (arredondamento)	5.400	100,0	750	100,0	880.000	100,0	62.000	100,0

Dados em TiO₂ contido; (ND) Dado não disponível; (-) Dado não divulgado ou nulo; ⁽¹⁾ Arredondado para as 100.000 toneladas mais próximas para evitar a divulgação de dados de propriedade da empresa; ⁽²⁾ Dados de produção e reservas de rutilo dos EUA estão incluídos com ilmenita.

de ligas com 29% de Ti em sua composição [2]. Os óxidos de Fe e Ti são reduzidos em presença de alumínio conforme mostrado na reação (1), produzindo a liga metálica e uma escória à base de alumina.



A capacidade de produção anual mundial da liga FeTi é de aproximadamente 64.000 toneladas. Os principais produtores são a London & Scandinavian Metallurgical em Rotterham, no Reino Unido (25 kt/ano) e a VSMPO, na Rússia (16 kt/ano). Em 2006 os preços do médios da liga FeTi (65,5Fe-30Ti-4,5Al) comercializada na forma de *lumps* de 25 kg era de US\$ 5,7/kg (ou seja, US\$17/kg de Ti contido na liga) [1].

O Ti forma ligas com o Fe em qualquer proporção, mas o diagrama de fases Fe-Ti apresenta 2 pontos eutéticos. O primeiro em 14% de Ti e o segundo em 68% de Ti [9]. Existem hoje quatro padrões comerciais da liga FeTi, baseados em seus teores de Ti, C, Si e Al, conforme apresentado na Tabela 2 [10]. No entanto, algumas empresas comercializam no Brasil ligas com especificações diferentes, tais como a Star Ligas (25-30% Ti) e a Comercial Cometa (25-35% Ti).

As últimas publicações da Agência Nacional de Mineração (ANM) mostram uma tendência à importação de produtos de Ti de maior valor agregado, enquanto pequenas quantidades de produtos de baixo valor agregado são exportados. Não há registros de produção interna da liga FeTi, sendo que o país importou cerca de 3.000 toneladas anuais a um preço de aproximadamente US\$ 4/kg (vide Tabela 3). Os principais municípios produtores de Ti são Mataraca/PB, Santa Bárbara de Goiás/GO e São Francisco de Itabapoana/RJ. Apenas três empresas processavam Ti

Tabela 2. Especificações químicas das ligas FeTi comerciais [10]

Elemento	Grau A	Grau B	Grau C	Grau D
Ti (%)	65-75	65-75	35-45	15-25
C (% máx.)	0,15	0,20	0,15	5,00
Si (% máx.)	0,25	0,25	5,00	5,00
Al (% máx.)	0,50	5,00	8,00	8,00

Tabela 3. Volumes de produtos de Ti comercializados pelo Brasil e seus respectivos preços [11]

	Produto	Unid.	2013 ^(a)	2014 ^(a)	2015 ^(b)
Produção	Concentrado de Ilmenita	(t)	78.264	81.278	78.991
	Concentrado de Rutilo	(t)	2.021	1.834	1.984
Importação	Minérios de Ti e concentrados	(t)	23.929	19.867	33.488
	Liga FeTi	(t)	2.245	2.933	3.212
	Obras de Ti	(t)	334	339	412
	Pigmentos (> 80% de TiO ₂)	(t)	139.102	135.633	114.723
	Ilmenita	(t)	49.691	66.028	16.619
Exportação	Liga FeTi	(t)	57	127	31
	Obras de Ti	(t)	5	4	13
	Outros	(t)	6.073	6.024	5.539
	Pigmentos - Dióxido de Titânio	(t)			
Preços⁽¹⁾	Minérios de Ti e concentrados	(US\$/t)	1.177	621	530
	Liga FeTi	(US\$/t)	4.613	4.288	3.771
	Obras de Ti	(US\$/t)	108.924	122.133	116.715
	Pigmentos (> 80% de TiO ₂)	(US\$/t)	2.805	2.503	2.244

⁽¹⁾ Preço médio: comércio exterior base importação; ^(a) Revisado; ^(b) Preliminar.

no Brasil em 2015, a Cristal Mineração do Brasil Ltda., a Indústrias Nucleares do Brasil S.A. e a Titânio Goiás Mineração Indústria e Comércio Ltda. A Cristal Mineração do Brasil, empresa pertencente ao grupo internacional Cristal Global, segundo maior produtor mundial de TiO_2 , foi responsável por mais de 80% da produção nacional de Ti beneficiado [11].

2 Materiais e métodos

Amostras da alimentação, rejeito da separação magnética, concentrado da flotação de carbonatos e silicatos, e concentrado e rejeito da flotação de Nb foram coletadas na planta BVFR da Niobras no intervalo de 3 dias de operação das plantas (entre 01 e 03/12/2017). Da planta Tailings foram coletadas amostras da alimentação e do concentrado e rejeito da flotação de Nb. As amostras coletadas foram submetidas a etapas de secagem em estufa, homogeneização e quarteamento de modo a obter alíquotas representativas de 1 kg cada, massa essa adequada às análises subsequentes. Análises de grau de liberação, definido como a porcentagem de uma espécie mineral que ocorre como partícula livre em relação ao somatório de partículas mistas e livres desta fase [12], associação mineral e granuloquímicas foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

A avaliação da forma de ocorrência das fases minerais presentes nas amostras foi efetuada de forma

automatizada, em seções polidas, utilizando o software *Mineral Liberation Analyser* (MLA) da FEI, acoplado a um microscópio eletrônico de varredura Quanta 650 FEG da FEI e sistema de microanálise por EDS Esprit da Bruker. As análises mineralógicas e associações minerais realizadas consideraram tanto o contraste de número atômico como a composição química de cada fase mineral, utilizando imagens de elétrons retroespalhados (BSE) e espectros de raios X característicos por EDS. Todos os produtos gerados no decorrer deste trabalho foram submetidos à análises químicas quantitativas por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) usando um espectrômetro AXIOX MAX série DY 5001 da PANalytical, operando com pastilhas fundidas. A perda ao fogo (PF) foi efetuada por gravimetria a 1.020°C por 2h.

3 Resultados e discussão

As análises químicas por FRX indicaram resultados interessantes com relação aos teores de Ti, elementos de terras raras, Th e Zr, conforme mostrado na Tabela 4. A amostra de concentrado de Nb da planta Tailings apresentou teor de Nb_2O_5 de aproximadamente 40%, valor esse 76,9% menor que o concentrado produzido na planta BVFR (aproximadamente 52%). O concentrado de Nb da planta Tailings apresentou teores próximos a 10% para TiO_2 e ZrO_2 , 2,0% de ThO_2 e 4,7% de óxidos de terras raras, ou simplesmente OTR (aproximadamente 2,0% de CeO_2 , 1,0%

Tabela 4. Resultados das análises químicas das amostras coletadas nas plantas BVFR e Tailings

Planta	BVFR						Tailings		
	Alim	Rej mag	Conc flot carb	Conc flot silic	Rej flot Nb	Conc flot Nb	Alim	Rej flot Nb	Conc flot Nb
Nb_2O_5	1,06	0,22	0,75	0,41	0,43	51,90	0,50	0,41	39,90
TiO_2	1,81	2,42	0,79	1,38	2,37	5,82	4,34	7,74	10,50
SiO_2	21,60	1,05	11,40	42,30	18,00	5,28	42,40	32,20	1,87
CaO	18,60	1,17	29,40	2,25	26,30	11,90	5,75	3,18	5,94
Fe_2O_3	15,30	91,50	7,33	14,80	7,59	3,96	34,70	43,30	5,65
MgO	6,14	0,76	5,66	11,80	4,74	1,58	1,55	1,97	0,43
K_2O	4,35	0,13	1,94	9,56	3,61	1,31	NA	<0,10	0,15
Al_2O_3	4,05	0,21	1,63	7,92	4,09	0,92	0,86	0,84	0,42
BaO	2,15	0,11	3,22	0,44	1,87	0,81	0,66	0,74	5,92
P_2O_5	1,71	0,05	5,01	0,11	0,43	0,14	4,63	3,25	0,94
SrO	1,33	0,07	2,09	0,12	1,24	1,35	0,24	NA	1,65
SO_3	1,00	0,55	1,59	0,88	0,59	0,48	NA	<0,10	0,08
Na_2O	0,44	<0,10	0,66	0,35	0,33	5,47	NA	NA	NA
MnO	0,22	0,17	0,26	0,15	0,30	0,06	0,61	NA	NA
ZrO_2	0,08	0,03	0,05	0,05	0,05	0,57	0,33	0,62	9,70
ThO_2	0,06	0,02	0,06	0,02	0,03	1,80	NA	0,07	2,05
Ta_2O_5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,75
UO_2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,51
PF	18,70	GF	24,80	6,44	27,40	4,28	3,25	4,20	5,16
OTR	0,64	0,08	1,170	0,09	0,43	2,20	0,98	0,96	4,71
Fechamento	99,24	98,54	97,81	99,07	99,80	99,83	100,80	99,48	96,33

Dados de percentual em massa; OTR: Soma dos teores dos óxidos de terras raras; PF: Perda ao fogo; GF: Ganho ao fogo; NA: elemento não dosado na curva quantitativa.

de Nd_2O_3). Já o rejeito dessa planta apresentou teor de TiO_2 igual a 7,7%. No tocante à alimentação das plantas, a planta Tailings apresentou teor de TiO_2 240% superior ao da planta BVFR (4,3% e 1,8%, respectivamente) o que explica os teores mais altos de Ti nos fluxos de saída desta planta. A planta BVFR apresentou a mesma tendência de enriquecimento de Ti, Th e OTR no concentrado de Nb, porém os teores foram menores que do os da planta Tailings. Isso deveu provavelmente aos menores na alimentação da planta BVFR. Nota-se que os teores de Zr na planta BVFR foram consideravelmente mais baixos que na planta Tailings, principalmente quando comparados os concentrados.

A Tabela 5 apresenta a análise mineralógica das amostras. É possível perceber que no concentrado de Nb da planta Tailings grande parte do Ti, Zr e Th, assim como uma fração do Nb e do Ce estavam na forma de zirkelita ($(\text{Ca,Th,Ce})\text{Zr}(\text{Ti,Nb})_2\text{O}_7$). Este mineral possui de composição química teórica de 32,19% ZrO_2 , 31,30% TiO_2 , 17,36% Nb_2O_5 , 8,79% CaO , 6,90% ThO_2 e 4,29% Ce_2O_3 [13]. Apenas 20% do TiO_2 estava na forma de ilmenita, anatásio e perovskita. Este resultado sugere que uma redução significativa do teor de Ti no concentrado de Nb da planta Tailings por operações

de processamento mineral é difícil, ou mesmo impossível, visto que a maior parte do Ti estava na fase zirkelita, que contém cerca de 10% do Nb do concentrado, sendo uma fonte considerável deste elemento. Segundo o diagrama de Ellingham, espera-se que a maior parte do Nb e do Ti contidos na zirkelita serão reduzidos e incorporados à liga FeNb, enquanto que os demais elementos (Zr, Ca, Th e Ce) não serão reduzidos e farão parte da escória.

No caso do concentrado de Nb da planta BVFR, a remoção da ilmenita contida nele (2,3%) provocaria a redução de mais de um 1% do teor de TiO_2 . Os fluxos potencialmente mais interessantes para a produção de Ti seriam o rejeito da flotação de Nb da planta Tailings (com 13% de ilmenita) e o rejeito da flotação de Nb da planta BVFR (com 3% de ilmenita).

A concentração de minerais é baseada nas diferenças de propriedades físicas e/ou físico-químicas entre os minerais que se deseja separar, sendo a sua performance dependente de fatores tais como a intensidade das diferenças supracitadas, o grau de liberação das fases minerais e granulometria, dentre outros. Testes adicionais ainda se fazem necessários para a correta definição do grau de liberação da ilmenita.

Tabela 5. Composição mineralógica das amostras estudadas

Planta	BVFR						Tailings			
	Mineral	Alim	Rej mag	Conc flot carb	Conc flot silic	Rej flot Nb	Conc flot Nb	Alim	Rej flot Nb	Conc flot Nb
Pirocloro		2,1	0,4	0,9	0,8	0,5	87,0	0,7	0,6	65,0
Calcita		23,0	1,0	1,8	33,0	36,0	0,1	-	-	-
Anquerita		8,1	0,7	1,9	10,0	12,0	0,5	-	-	-
Dolomita		4,8	0,4	1,1	6,3	7,6	0,2	-	-	-
Siderita		1,3	2,5	0,4	1,0	1,4	0,4	-	-	-
Outros carbonatos (BaSr)		2,9	0,1	0,3	6,6	2,3	0,1	-	-	-
Estroncianita		1,2	<0,1	0,1	2,9	0,9	<0,1	-	-	-
Zirkelita		-	-	-	-	-	-	0,5	1,2	27,0
Goethita		-	-	-	-	-	-	14,0	25,0	1,1
K-feldspato		15,0	0,3	24,0	3,2	19,0	2,4	-	<0,1	0,1
Argilominerais		22,0	0,9	61,0	17,0	9,1	3,9	2,4	1,0	0,1
Piroxênio/anfibólio		1,5	0,2	1,5	1,1	1,8	0,2	-	-	-
Quartzo		1,8	0,1	3,3	0,9	2,0	0,1	41,0	29,0	1,0
Ilmenita		2,0	0,9	0,6	0,4	3,0	2,3	7,5	13,0	1,9
Rutilo		0,4	0,4	0,3	0,3	0,7	1,1	-	-	-
Anatásio		-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,4
Perovskita		-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,7
Óxidos de ferro		7,6	91,0	1,3	0,5	0,3	0,1	19,0	18,0	0,6
Óxido-FeMn		-	-	-	-	-	-	0,9	-	-
Barita		1,2	<0,1	0,2	1,6	1,6	<0,1	-	-	-
Monazita		-	-	-	-	-	-	1,5	2,9	0,6
Apatita		4,5	0,1	0,2	13,0	0,9	0,4	9,7	5,0	0,2
Al-fosfato		-	-	-	-	-	-	1,9	2,8	0,8
Baddeleita		-	-	-	-	-	-	-	0,6	1,1
Óxido-MnBa		-	-	-	-	-	-	0,2	1,0	0,1
Pirita		0,5	0,7	0,6	0,9	0,1	1,0	-	-	-
Outros		0,6	0,2	0,3	0,7	0,5	1,1	1,0	0,3	0,1
Fechamento		100,5	99,9	99,8	100,2	99,7	100,9	100,3	100,7	100,8

Dados de percentual em massa. (-) Não detectado ou detectado em quantidade muito pequena e somado a "outros"; argilominerais = micas e clorita; óxidos de ferro = magnetita e hematita.

Contudo, as análises de grau de liberação realizadas para o pirocloro indicaram liberações maiores que 90% nos concentrados de ambas plantas e cerca de 7% em associações binárias. Este fato deve-se em grande parte à distribuição do tamanho de partículas ($d_{10} = 24,72 \mu\text{m}$, $d_{50} = 64,00 \mu\text{m}$ e $d_{90} = 220,43 \mu\text{m}$). Já para os rejeitos da flotação de Nb foram encontradas cerca de 66% das partículas de pirocloro liberadas, aproximadamente 24% em associações binárias e 10% em associações de três ou mais minerais, com distribuição de tamanho de partículas mais grosseiro ($d_{10} = 41,04 \mu\text{m}$, $d_{50} = 111,94 \mu\text{m}$ e $d_{90} = 253,76 \mu\text{m}$). Analisando a composição mineralógica dos rejeitos das flotações de Nb das duas plantas nota-se que pelo menos três propriedades diferenciadoras podem ser utilizadas na produção de concentrado de Ti, sendo elas a massa específica, susceptibilidade magnética e condutividade elétrica.

Segundo Premaratne e Rowson [14], a ilmenita comumente ocorre alterada em misturas de TiO_2 , FeO e Fe_2O_3 , com o teor de TiO_2 aumentando de 49 para 75% à medida que o mineral oxidado é o Fe é lixiviado pela água subterrânea. Testes em escala de bancada e/ou piloto simulando operações industriais de separação magnética, concentração gravítica, separação eletrostática e flotação dos minerais portadores de Ti ainda precisam ser realizados. É impossível prever a performance de um processo de concentração sem a realização dessas etapas, porém, para efeito de avaliação inicial do potencial do negócio. Contudo, uma ferramenta útil para a análise de risco é simular cenários, desde os mais conservadores aos mais otimistas. Com esse objetivo foi construída a Tabela 6 com dados da operação atual fornecidos pela Niobras, resultados das análises mineralógicas e químicas. Três cenários foram simulados, variando-se a recuperação mássica de ilmenita e disponibilidade física da planta de produção de ilmenita. Devido à falta de informações sobre o grau de liberação e teor da ilmenita, o cenário pessimista foi traçado assumindo uma recuperação mássica de ilmenita de 35%. Para o cenário otimista foi assumida uma recuperação mássica de 55%.

Para a disponibilidade física da planta (DF), aqui entendida como o total de horas operadas pela mesma, foi assumida uma variação de 80 a 90%, valores razoáveis para a indústria mineral. Foi considerado o somatório das plantas BVFR e BV para o processamento do minério oriundo da Mina Boa Vista, visto que ambas plantas têm processos similares.

Uma possibilidade é a venda de concentrado de ilmenita, como é feito por algumas minas brasileiras, a preços médios de US\$ 100,00 a US\$ 150,00 por tonelada, com teor de mínimo de TiO_2 de 50%. Porém, no caso do minério de Catalão e região, existe uma possibilidade real de que o concentrado de ilmenita contenha teores de U e Th que possa impedir a sua comercialização. Além disso, o concentrado de ilmenita trata-se de um produto com baixo valor comercial quando comparado à liga FeTi. Desta forma, uma opção viável seria fechar a cadeia produtiva, produzindo a liga FeTi via processo aluminotérmico. Processo este já adotado industrialmente pela Niobras para a produção da liga FeNb e que este processo produz liga metálica livre dos isótopos supracitados. No processo aluminotérmico, entre 70 a 75% do titânio contido na ilmenita é reduzido à sua forma metálica e incorporado à liga FeTi. O maior custo desse processo é com insumos, particularmente o Al metálico em pó. Estequiometricamente são necessárias 2 partes de Al para cada parte de Ti produzida, como pode ser visto na reação (1), ou seja, são necessários 2 kg de alumínio para produzir 1 kg de Ti contido na liga FeTi [2]. A nível de comparação, na produção industrial da liga FeNb, relação Al:Nb é aproximadamente 1:1. Este fato, aliado ao preço de venda da liga FeTi substancialmente menor que a liga FeNb, pode reduzir a margem de lucro do negócio. Contudo, a produção da liga FeTi em paralelo à produção da liga FeNb permitirá a produção da nova liga sem a geração de custos adicionais de lavra e cominuição, reduzindo consideravelmente o custo de produção da mesma.

Tabela 6. Simulação da produção de ilmenita, FeTi e faturamento bruto anual

Cenário	Pessimista		Realista		Otimista		
	Planta	BVFR+BV	Tailings	BVFR+BV	Tailings	BVFR+BV	Tailings
Taxa de alimentação (t/h)		275	140	275	140	275	140
Dist. Mass. Rej. flot. Nb (%)		37	40	37	40	37	40
TiO_2 rej. flot. Nb (%)		2,37	7,74	2,37	7,74	2,37	7,74
Ilmenita no rej. flot. Nb (%)		3,0	13,0	3,0	13,0	3,0	13,0
Ilmenita disponível (t/h)		10		10		10	
Recuperação de ilmenita (%)		35		45		55	
DF (%)		80		85		90	
Ilmenita (t/ano)		25.344		34.621		44.804	
Preço ilmenita (US\$/t)		100		125		150	
Venda ilmenita (US\$/ano)		2.534.356		4.327.638		6.720.568	
Rec. met. aluminot. (%)		65		70		75	
Ti na liga FeTi (t/ano)		5.230		7.694		10.668	
Preço de venda (US\$/t Ti)		7.000		8.000		9.000	
Vend. FeTi (US\$/ano)		36.608.475		61.550.513		96.011.042	

4 Conclusões

O principal mineral portador de Ti presente no minério de Nb da região de Catalão é a ilmenita, apesar de existir ocorrência de Ti disseminado em outras fases minerais. Os rejeitos das flotações de Nb foram os fluxos analisados que contém maiores teores de ilmenita (3,0% da planta BVFR e 13,0% da planta Tailings). Em termos de aproveitamento do Ti, estes fluxos são de grande interesse por tratar-se de um material sem nenhuma utilização atual, que é enviado diretamente para a barragem de rejeitos. O aproveitamento industrial da ilmenita presente nos rejeitos das flotações de Nb tem potencial de reduzir em mais de 30.000 t/ano de material destinado às barragens da Niobras.

Contudo, ensaios de concentração da ilmenita contida nos rejeitos em escala de bancada e/ou piloto se mostram necessários de modo a validar os cenários propostos. Teoricamente, as principais propriedades diferenciadoras entre a ilmenita e as demais fases minerais de ganga são a susceptibilidade magnética, massa específica e condutividade

elétrica. Ainda além, não pode-se descartar a possibilidade do emprego de etapas de flotação.

No tocante à produção da liga FeTi, este produto tem potencial para se tornar um novo negócio, com faturamento anual entre US\$ 37 milhões a US\$ 96 milhões. A produção de FeTi, através do processo aluminotérmico, se mostra uma alternativa interessante e viável para o aproveitamento da ilmenita que atualmente é enviada para a barragem de rejeitos. Tal processo, capaz de produzir uma liga FeTi isenta de U e Th, já é realizado industrialmente pela Niobras. Desta forma não existiria a necessidade de aquisição de equipamentos ou insumos diferentes dos que atualmente são empregados na produção da liga FeNb, o que tem potencial para reduzir o investimento através do compartilhamento das instalações industriais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à empresa Niobras/CMOC por permitir a realização desta pesquisa, CNPq pelo financiamento do projeto, ao LaMPPMin e à UFCat.

Referências

- 1 Cardarelli F. Materials handbook: a concise desktop reference. 2nd ed. London: Springer-Verlag; 2008.
- 2 Riss M, Khodorovsky Y. Production of ferroalloys. Moscow: Foreign Languages Publishing House; 1963.
- 3 Bedinger GM. Titanium: minerals yearbook. Reston: USGS; 2018.
- 4 Amorim AA No, Almeida ABL. Titânio. In: Brasil. Economia mineral do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral; 2009.
- 5 Bedinger GM. Titanium: mineral commodity summaries 2019. Reston: USGS; 2019.
- 6 Baltar CAM, Cunha ASF. Aproveitamento de finos de ilmenita por flotação com succinamato. In: Anais do XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2004; Florianópolis. Vol. 2. Belo Horizonte: UEMG; 2004. p. 51-59.
- 7 Zhong K, Cui L. Influence of Fe²⁺ ions of ilmenite on its flotability. International Journal of Mineral Processing. 1987;20(3-4):253-265.
- 8 Fan X, Rowson NA. The effect of Pb(NO₃)₂ on ilmenite flotation. Minerals Engineering. 2000;13(2):205-221.
- 9 Infomet. Diagrama de fases Fe-Ti. 2019 [acesso em 12 jul. 2019]. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/diagrama-de-fases-ver.php?cod=246>
- 10 COMETAL. Ferro titânio: generalidades. 2018 [acesso em 12 jul. 2018]. Disponível em: <http://www.cometalsa.com/productos-y-servicios/ferroaleaciones-en-piedra/2#ancla14>
- 11 Queiroz AA Fo, Amorim AA No. Titânio: sumário mineral. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral; 2016.
- 12 Gaudin AM. Principles of mineral dressing. London: McGraw Hill; 1939.
- 13 Webmineral. Zirkelite Mineral Data. 2019 [acesso em 12 jul. 2019]. Disponível em: <http://webmineral.com/data/Zirkelite.shtml#.XSjVvuhKjIU>
- 14 Premaratne WAPJR, Rowson NA. Recovery of Titanium from beach sand by physical separation. The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection. 2004;4(3):183-193.

Recebido em: 2 Ago. 2019

Aceito em: 30 Set. 2020