

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGEM

Caracterização do Concentrado de Ilmenita produzido na Mina do Guaju, Paraíba, visando
identificar Inclusões de Monazita e outros Contaminantes

Karime Ribeiro e Silva Ferreira

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2006

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGEM

Caracterização do Concentrado de Ilmenita produzido na Mina do Guaju, Paraíba, visando
identificar Inclusões de Monazita e outros Contaminantes

Karime Ribeiro e Silva Ferreira
Engenheira de Minas

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM,
como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre
2006

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sydney Sabedot – UNILASALLE/RS

Dr. Gerson Luis Miltzarek – UFRGS/RS

Dr. Giovanni Dalpiaz – UFRGS/RS

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

Dedico em especial a meus pais Heitor da
Silva Ferreira e Magali Ribeiro e Silva
Ferreira.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas e instituições que colaboraram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, manifesto meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Dr. Carlos Hoffmann Sampaio pelo estímulo proporcionado através do incentivo às idéias propostas neste estudo e garantia de sua orientação, além de disponibilizar recursos financeiros e tecnológicos do Laboratório de Processamento Mineral.

A todo corpo técnico e administrativo da empresa Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A, em especial ao Gerente Geraldo José Morais Silva por proporcionar a visita e a estadia na Empresa, além de disponibilizar as amostras para este estudo. Ao Engenheiro Kaiser Gamba Correia pelo apoio total à pesquisa fornecendo todas as informações necessárias para o desenvolvimento deste estudo. Ao funcionário João Albino Vidal da Cruz, que além de me ajudar no que precisei, se tornou um grande amigo, cuja amizade estimo muito. Quero mencionar também Adriana, Vicente, Raimundo, Antônio Almeida e Marcos por toda a ajuda necessária e amizade também conquistada.

A todos os colegas do LAPROM, mestres e mestrandos, doutores e doutorandos, em especial Pacheco, Giovani, Hamilcar, Gerson e Isabela e, ao professor Dr. Carlos Otávio Petter, pela ajuda mútua tanto em sugestões, palpites, discussões, além de uma agradável convivência durante todo o período desta pesquisa no laboratório.

Ao professor Dr. Sydney Sabedot por toda a orientação valiosa e paciência ao desenvolvimento desta pesquisa, além de sua amizade.

A professora Dra. Gelsa Edith por disponibilizar sua ajuda na utilização do MEV do LAMEF, além de suas importantes sugestões, opiniões e companheirismo.

A todos os bolsistas de Iniciação Científica que atuam no LAPROM e LASID, em especial a minha grande amiga Josiane Barbieri e a Juliana pelos valiosos auxílios no decorrer da pesquisa.

Aos engenheiros Thiago Ferri e Maurício Bagatini pelas valiosas ajudas no preparo das amostras para as análises no MEV.

Ao grande amigo Ernesto pela grande amizade e, cujo companheirismo e ajuda foram fundamentais para este trabalho.

Às amigas Cláudia, Luciana, Carmen e Aline pelo apoio e companheirismo proporcionado e, também, ao meu amigo Wagner.

Ao meu namorado Fabricio que não mediu esforços pra me ajudar, principalmente, na etapa final deste trabalho, além de toda paciência e companheirismo dos quais serei grata eternamente.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida, além do PPGEM, aos seus funcionários e professores pelo apoio e pela disponibilidade pessoal e técnica para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 JAZIDA	4
2.1.1 Geologia Regional	5
2.1.2 Geologia Local	5
2.1.3 Lavra e processamento mineral	6
2.2 ESTADO DA ARTE DA ILMENITA	9
2.2.1 História	10
2.2.2 Mineralogia.....	10
2.2.3 Composição química	12
2.2.4 Geologia	13
2.2.5 Principais ocorrências.....	14
2.2.6 Métodos de lavra	15
2.2.7 Tratamento de minério ROM	17
2.2.8 Principais usos	18
2.2.9 Mercado	19
2.2.10 Produção de pigmento de dióxido de titânio	20
2.3 A MONAZITA	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	23
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	23
3.3 ANÁLISE DE INCLUSÕES.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	25
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	25
4.3 ANÁLISE DE INCLUSÕES.....	29
5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO I.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da Mina do Guaju.....	4
Figura 2. Lavra da Mina do Guaju por draga acoplada com a planta móvel de pré-tratamento.....	7
Figura 3. Fluxograma simplificado do processamento mineral na planta fixa.....	8
Figura 4. Fluxograma da planta VSI.....	9
Figura 5. Concentrado de ilmenita observada em lupa.....	26
Figura 6. Grãos de ilmenita e de leucoxeno, em aumento de 80 vezes.....	27
Figura 7. Imagem do MEV de vazios deixados por inclusões arredondadas em um grão de ilmenita.....	29
Figura 8. Espectro de um vazio deixado por inclusão mostrado na figura 7.....	30
Figura 9. Imagem do MEV de um vazio deixado por inclusão alongada em um grão de ilmenita.....	31
Figura 10. Imagem do MEV de um vazio deixado por uma inclusão bipiramidal em um grão de ilmenita.....	32
Figura 11. Imagem do MEV de três vazios deixados por inclusões alongadas em um grão de ilmenita.....	32
Figura 12. Espectro do vazio número1 deixado por uma inclusão, mostrado na figura 11. ...	33
Figura 13. Espectro do vazio número 2 deixado por uma inclusão, mostrado na figura 11. ...	33
Figura 14. Imagem do MEV de duas inclusões (1 e 2) em um grão de ilmenita.....	34
Figura 15. Espectro da inclusão de número 1 mostrada na figura 14.....	34
Figura 16. Espectro da inclusão de número 2 mostrada na figura 14.....	35
Figura 17. Imagem do MEV de provável inclusão de zircão em um grão de ilmenita.....	35
Figura 18. Espectro da inclusão mostrada na figura 17.....	36
Figura 19. Imagem do MEV de uma inclusão de quartzo em um grão de ilmenita.....	36
Figura 20. Espectro da inclusão mostrada na figura 19.....	37
Figura 21. Imagem do MEV de várias inclusões de quartzo em um grão de ilmenita.....	37
Figura 22. Espectro da inclusão mostrada na figura 21.....	38

Figura 23. Imagens do MEV de inclusões minerais contendo alumínio em alguns grãos de ilmenita.	45
Figura 24. Espectro das inclusões minerais mostradas na figura 23.	45
Figura 25. Imagem do MEV de pequenas vazios deixados por inclusões (1 e 2) em um grão de ilmenita.	46
Figura 26. Espectro do vazio número 1, deixado por uma inclusão mineral mostrado na figura 25.	46
Figura 27 Espectro do vazio número 2, deixado por uma inclusão mineral mostrado na figura 25.	47
Figura 28. Imagem do MEV de vazios deixados por inclusões minerais em alguns grãos de ilmenita.	47
Figura 29. Espectro dos vazios deixados por inclusões minerais mostradas na figura 28.	47
Figura 30. Imagens do MEV de inclusões de quartzo em alguns grãos de ilmenita.	48
Figura 31. Espectro das inclusões de quartzo mostradas na figura 30.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Reservas e produção mundial do concentrado de ilmenita, em 2004.....	14
Tabela 2. Reservas minerais brasileiras de ilmenita com TiO ₂ contido, em 2004.	15
Tabela 3. Valor da ilmenita beneficiada (TiO ₂) e as principais empresas produtoras.....	20
Tabela 4. Distribuição granulométrica do concentrado de ilmenita.....	25
Tabela 5. Composição mineralógica do concentrado de ilmenita.	26
Tabela 6. Principais substâncias controladas no concentrado de ilmenita para a produção de pigmento.	28

LISTA DE SÍMBOLOS

km	quilômetro
kg	quilograma
kv	quilovolt
m	metro
mm	milímetro
m ³	metro cúbico
R\$	Real (moeda brasileira)
t	tonelada
µm	micrômetro

LISTA DE ABREVIATURAS

CME	Centro de Microscopia Eletrônica
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDS	Espectrômetro de Dispersão de Energia
ETR	Elementos Terras Raras
EUA	Estados Unidos da América
FOB	Mercadoria Livre a Bordo (Free on Board)
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LTDA	Limitada
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	Minerais Pesados
ROM	run-of-mine
S/A	Sociedade Anônima
SMU	Separação Magnética Úmida
VSI	Via Seca Ilmenita
VSZ	Via Seca Zirconita
VUZ	Via Úmida Zirconita
UF	Unidade de Federação
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

O presente estudo tem como proposta, identificar o modo como o mineral monazita se encontra no concentrado final de ilmenita. Este concentrado é o produto resultante do beneficiamento do minério extraído de depósitos do tipo pláceres, conhecidos como depósitos de areias pretas. Estes depósitos são formados por dunas litorâneas pertencentes à jazida do Guaju, no município de Mataraca-PB. Todo o processo de lavra e beneficiamento deste minério ocorre na Mina do Guaju, a qual é operada pela empresa Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A, pertencente a Lyondell Chemical Company.

A ilmenita é um mineral composto por óxido de ferro e titânio, FeTiO_3 . Quase toda a ilmenita produzida na mina é transferida para o processo de fabricação de pigmento. A exigência para o uso na fabricação de pigmento é de que o concentrado final de ilmenita tenha um teor mínimo de 53% de TiO_2 e um teor máximo de 0,1% de P_2O_5 , entre outras substâncias. A monazita é o principal mineral fonte de óxido de tório, que é radioativo. No processo de fabricação de pigmento, a monazita é um contaminante indesejado.

De acordo com a proposta de trabalho, foi feito um estudo de caracterização mineralógica de amostras do concentrado final de ilmenita fornecidas pela empresa. Inicialmente foram feitas análises em lupa, onde muitos grãos de leucoxeno foram identificados. O leucoxeno é uma alteração da ilmenita que permanece com as mesmas características magnéticas e eletrostáticas, tornando impossível, assim, a sua separação no processo de concentração. Também foi verificada a existência de grãos de monazita liberados em pequenas quantidades neste concentrado, indicando uma provável ineficiência no processo de separação.

Numa segunda etapa foram realizadas análises dos grãos de ilmenita com o uso de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS), para permitir a determinação de elementos químicos na amostra. Esta análise teve como objetivo verificar a existência de inclusões de monazita nos grãos de ilmenita. Porém, o que se observou foi a existência de algumas inclusões de quartzo e de alguns vazios deixados, provavelmente, por inclusões arrancadas durante o processo de preparação das amostras. Alguns destes vazios apresentaram formas semelhantes a de cristais de monazita, indicando a possibilidade da existência de inclusões deste mineral. Entretanto, a quantidade

de grãos com possíveis inclusões de monazita é muito pequena, sendo insignificante como contaminante do concentrado final. Embora alguns vazios se assemelhem à forma da monazita, nenhum dos resultados do EDS identificou vestígios de sua presença.

Ao final deste estudo ficou evidente que a principal fonte de contaminação do concentrado final de ilmenita corresponde à monazita, a qual se encontra liberada neste concentrado. Desta forma, há a necessidade de se melhorar o processo de separação dos minerais, de modo que a quantidade de monazita no concentrado final seja a menor possível, não prejudicando o rendimento da recuperação de ilmenita.

ABSTRACT

This study aims to identify how the mineral monazite lies in ilmenite's final concentrate. This concentrate is the resultant product of ore processing from placers deposits, knowledge as black sands' deposits. These deposits are formed on the beach sands of Guaju's bed, in Mataraca city. All the mining and the processing occur in the Guaju's Mine, that's operated by the Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A, of Lyondell Chemical Company.

The ilmenite is an iron-oxide and titanium mineral, FeTiO_3 . Almost all the ilmenite from Guaju's Mine is transferred to pigment fabrication process. The pigment fabrication requires that the ilmenite's concentrate have a minimum TiO_2 (ilmenite) grade of 53% and a maximum P_2O_5 (monazite) grade of 0.1%. The monazite is the main thorium-oxide (ThO_2) source mineral. In the pigment fabrication process the monazite is an undesired contaminant.

In accordance with the work proposal, was made a study of mineralogical characterization of samples from final concentrate supplied by the company. Initially analyses in magnifying glass had been made, where many grains of leucoxene had been identified. The leucoxeno is an ilmenite's alteration that remains with the same magnetic and electrostatic characteristics, this way making impossible its separation in the concentration process. Was verified the existence of free monazite grains in small amounts in this concentrate too. This indicates a probable inefficiency in the separation process.

In one second stage analyses of ilmenite's grains had been carried in Scanning Electron Microscope (SEM), connected to a Spectrometer of Dispersion of Energy (EDS), to allow the determination of chemical elements in the sample. This analysis had as objective to verify the existence of monazite's inclusions in the ilmenite's grains. However, the existence of some inclusions of quartz and some emptinesses left probably for inclusions pulled out during the sample preparation process was observed. Some of these emptinesses had presented similar forms to the monazite's crystals, indicading the possibility of the existence of inclusions of this mineral. However, the amount of grains with possible monazite's inclusions is very small, being insignificant as contaminant of the final concentrate. Although some emptinesses are similar to monazite's crystals, none of the EDS's results identified vestiges of its presence.

At the end of this study it was evident that the main source of contamination of the ilmenite's final concentrate corresponds to the monazite, which flows free in this concentrate. This way, this study shows the necessity of improving the minerals' separation process in order to reduce the amount of monazite in the final concentrate, not harming the income of the ilmenite recovery.

1 INTRODUÇÃO

O dióxido de titânio (TiO_2) tem sido utilizado em quantidades cada vez maiores como pigmento branco na fabricação, principalmente, de tintas e vernizes, devido ao seu alto índice de refração, opacidade e poder de cobertura. O segundo maior campo é na indústria de papel, na fabricação de papel fotográfico e de todo tipo de papel para impressão, exceto jornal. Outras aplicações são na indústria de plásticos, borrachas para pneus, esmaltes para porcelanas, encerados, revestimentos de paredes e fibra de vidro. Como principal fonte de matéria-prima para a sua obtenção, destaca-se a ilmenita, que vem suprimindo cerca de 90% da demanda mundial de minerais de titânio (Ré & Marques, 2002).

A ilmenita é um mineral composto de ferro e titânio, na forma cristalina, FeTiO_3 , podendo ser considerada pura com os valores em torno de 53% de TiO_2 e em torno de 47% de FeO (Dana, 1969). Devido a sua elevada densidade relativa (em torno de 4,5 a 5), é caracterizada como um mineral pesado, sendo encontrada em todos os sedimentos detríticos, podendo se concentrar, principalmente, em areias de praias, conhecidas como depósitos de areias pretas (Deer *et al*, 1966). Nestes tipos de depósitos é comum estar associada com outros minerais pesados, tais como magnetita, granada, monazita, estauroлита, rutilo, zircão e cianita, entre outros. A exploração destes depósitos, devido a sua natureza física, é feita normalmente por pás-carregadeiras ou através de sucção hidráulica. Neste último caso, os sedimentos superficiais são removidos até que seja atingido o lençol freático, criando-se um grande lago onde é instalada uma unidade de dragagem (Silva, 2000). O material dragado é despejado diretamente por gravidade nas espirais concentradoras que representam o principal equipamento usado na obtenção do pré-concentrado de minerais pesados, no qual são usadas em múltiplos estágios de separação. Após secagem, este pré-concentrado é sujeito à separação sucessiva por outros métodos gravimétricos, elétricos e magnéticos (Sampaio & Tavares, 2005).

Das principais reservas mundiais de ilmenita, recebem destaque as da China, da Austrália e da África do Sul. No Brasil, as principais reservas estão distribuídas nos seguintes estados: Bahia, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Pernambuco, Rio de Janeiro, Santa Catarina e, principalmente, Paraíba, em cujo município de Mataraca se encontram os depósitos mais importantes, representando 64% das reservas brasileiras (Maia, 2005).

Uma das características principais da ilmenita é a ocorrência de leucoxeno, mineral de alteração, resultante da lixiviação do ferro presente na estrutura da ilmenita. Este mineral não contém valor comercial, apresentando teor de TiO_2 acima de 68% (Deer *et al*, 1966).

Outra característica da ilmenita é a sua associação com a monazita, que é um mineral do grupo fosfato mais comum de Elementos Terras Raras (ETR) (Toledo *et al*, 2004). A monazita é o principal mineral fonte de óxido de tório em quantidades que podem variar entre 1 e 20%. Este elemento tório é radioativo e recebe considerável atenção como principal contaminante dos concentrados de ilmenita (Dana, 1969).

No Brasil, a maior produtora de ilmenita é a empresa Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A que contribui com 57,5% da produção nacional de dióxido de titânio (DNPM, 2005). Sua unidade de lavra, denominada de Mina do Guaju, está localizada no município de Mataraca-PB, onde a ilmenita ocorre disseminada em dunas litorâneas.

O beneficiamento tem como principal produto o concentrado de ilmenita, além de concentrados de zircão, rutilo e cianita, representando co-produtos do beneficiamento destas dunas. Como já citado, a monazita aparece como o principal contaminante deste concentrado de ilmenita.

Tendo em vista a questão do contaminante, a empresa forneceu amostras de concentrado de ilmenita para servirem de objeto deste estudo, cuja finalidade é identificar a maneira como a monazita se encontra no concentrado final de ilmenita. A monazita é um mineral radioativo que sobra no processo de fabricação de pigmento em Camaçari-BA da própria Millennium, provocando a formação de um rejeito indesejável e, criando um impacto ambiental que a empresa quer diminuir. Além disto, parte da monazita entra no pigmento, contaminado-o.

Para tanto, foi realizada uma caracterização mineralógica do concentrado de ilmenita, buscando identificar possíveis minerais contaminantes. Além dos contaminantes, também foi importante identificar e quantificar a presença de leucoxeno.

Também foram feitas análises mais detalhadas dos grãos de ilmenita, buscando identificar a natureza de possíveis inclusões minerais, principalmente de monazita ou outro mineral radioativo.

A fim de adquirir conhecimento sobre a jazida e os processos de lavra e beneficiamento, para a obtenção do concentrado de ilmenita, foi realizado um acompanhamento junto à empresa Millennium, em Mataraca-PB.

Ao longo desta dissertação é apresentado um estado da arte a respeito do mineral ilmenita, bem como os procedimentos de caracterização mineralógica e análises de inclusões minerais em detalhe, com os resultados e conclusões obtidos.

2.1.1 Geologia Regional

A área de estudo encontra-se regionalmente inserida na Faixa Sedimentar Costeira da Paraíba, onde ocorre uma seqüência meso-cenozóica, de idade cretácico-paleocênica, que se constitui de duas fácies principais: fácies continental, com predominância dos arenitos da Formação Beberibe e a fácies marinha, compreendendo, da base para o topo, as formações Itamaracá (arenitos carbonáticos), Gramame e Maria Farinha (ambas representadas por calcários e margas), sendo as três primeiras datadas do Cretáceo Superior e a última do Paleoceno (Beurlen *et al*, *apud* Caúla & Dantas, 1997).

Por outro lado, Amaral & Menor, *apud* Caúla & Dantas (1997), subdividiram litologicamente a seqüência em dois segmentos: uma clástica basal, reunindo as formações Beberibe e Itamaracá e outra carbonática superior, compreendendo as formações Gramame e Maria Farinha.

Capeando todo este conjunto ocorrem os sedimentos areno-argilosos terciário-quaternários do Grupo Barreiras, que ocorrem em forma de tabuleiros, com suave inclinação em direção ao mar e, finalmente, os sedimentos inconsolidados de idade quaternária, representados pelas coberturas arenosas, terraços fluviais, aluviões, areias de praias e dunas, estas últimas se revestindo de máxima importância, haja vista encerrarem as mineralizações titano-zirconíferas de Mataraca (Caúla & Dantas, 1997).

2.1.2 Geologia Local

Os depósitos da jazida são depósitos sedimentares de origem secundária, constituindo pláceres e são denominados dunas, cujas deposições são recentes e resultam da ação conjunta da água e dos ventos. Os minerais pesados e leves são trazidos pelos rios e distribuídos ao longo das praias pelas correntes paralelas à costa. Os ventos carregam estes minerais para o interior, formando imensas dunas, ora fixadas pela vegetação e ora móveis, que cobrem uma grande faixa da Formação Barreiras. Os teores dos minerais pesados, segundo Caúla & Dantas (1997), variam entre 3,3 e 5%, sendo explorados economicamente a ilmenita, o zircão, o rutilo e a cianita. Há pouca ocorrência de outros minerais pesados, como estauroлита, turmalina e monazita, entre outros. O principal mineral leve é o quartzo e constitui a ganga da jazida (Sabadot & Sampaio, 2002).

Os depósitos de Mataraca são comparados, segundo Bessa *apud* Caúla & Dantas (1997), àqueles existentes nas dunas dos litorais maranhense e piauiense, e conclui que os mesmos diferem totalmente dos depósitos encontrados nos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia, que, por sua vez, são classificados nos seguintes tipos:

- Concentrações em praias recentes, ao pé de Barreira Terciária (Cumuruxatiba, sul da Bahia);
- Concentrações em praias antigas, ao pé da Barreira e ora recobertas por estéril (jazidas exauridas do Espírito Santo);
- Concentrações em praias fósseis, formando um ou vários cordões (*strand-lines*) paralelos ou subparalelos à Barreira e hoje recobertos por estéril (barra do Itabapoana, Estado do Rio de Janeiro);
- Concentrações deltaicas (delta do rio Doce).

2.1.3 Lavra e processamento mineral

A lavra na Mina do Guaju é realizada a céu aberto por desmonte mecânico, através de uma draga do tipo sucção e recalque, que escava a areia a partir da base da duna. O ângulo de repouso dos taludes das dunas é de 35°. A área dragada é denominada de bacia ou lagoa artificial, sendo preenchida pela água do rio Guaju e apresenta dimensões de comprimento, largura e profundidade aproximadamente de 250 m, 200 m e 10 m, respectivamente. O material localizado na parte superior da jazida cai por gravidade ao nível de operação da lavra, formando uma polpa que é bombeada para a primeira etapa do processamento mineral localizado junto ao Complexo Draga, denominada de planta móvel (flutuante). Ainda são utilizados monitores de desmonte hidráulico, acoplados à draga, quando o material acima não cai naturalmente. Na planta móvel é realizada a primeira etapa de concentração (um pré-tratamento) com espirais concentradoras de Humphreys, onde são extraídos aproximadamente 1.080.000 t/mês de minério ROM (*run-of-mine*), com uma média aproximada de 80% de minerais pesados (MP). Os rejeitos gerados são bombeados de tal forma que reconstituem a topografia das dunas.

Na figura 2 é mostrada uma foto aérea do Complexo Draga acoplado à planta móvel na Mina do Guaju.



Figura 2. Lavra da Mina do Guaju por draga acoplada com a planta móvel de pré-tratamento.

O pré-concentrado é bombeado para uma pilha pulmão próxima à lagoa e posteriormente é levado por caminhão até a planta industrial, denominada de planta fixa, onde são realizadas as separações dos minerais ilmenita, zircão, rutilo e cianita, através de separadores magnéticos e eletrostáticos, além de separadores gravimétricos, como mesas vibratórias e espirais.

Como mostra a figura 3, a primeira etapa das plantas fixas é constituída pela SMU, denominada de Separação Magnética Úmida, onde são utilizados basicamente separadores magnéticos do tipo rolo e carrossel. Nesta etapa são gerados dois concentrados: o magnético e o não magnético, além do rejeito. O concentrado magnético (pré-concentrado de ilmenita), alimentará a etapa da VSI, denominada Via Seca Ilmenita, que gerará o concentrado final de ilmenita. Na VSI são utilizados, principalmente, separadores eletrostáticos LURGI do tipo rolo com eletrodo de tungstênio, separadores magnéticos terras raras do tipo tambor e, ainda, um separador eletromagnético de campo induzido. O concentrado não magnético seguirá para as etapas VUZ, denominada Via Úmida Zirconita e VSZ, denominada Via Seca Zirconita, onde serão processados os demais minerais de valor econômico. A VUZ é constituída principalmente de mesas vibratórias (Humboldt) e espirais concentradoras (Humphreys). Nesta etapa são processados os pré-concentrados de zircão, rutilo e cianita. Cada um destes

pré-concentrados, na próxima etapa da VSZ, é processado individualmente e em batelada, a fim de se obter sua concentração final. Esta etapa é constituída principalmente por separadores magnéticos Permroll do tipo rolos com ímã permanente e separadores eletrostáticos do tipo rolos (LURGI) e de placas. O rejeito gerado é utilizado para a reconstituição da topografia das dunas.

A maior produção mineral é de ilmenita com aproximadamente 114.000 t/ano de concentrado. Em seguida é a produção de zircão com 19.000 t/ano, depois a de rutilo com 1.950 t/ano e por fim a de cianita com 400 t/ano.

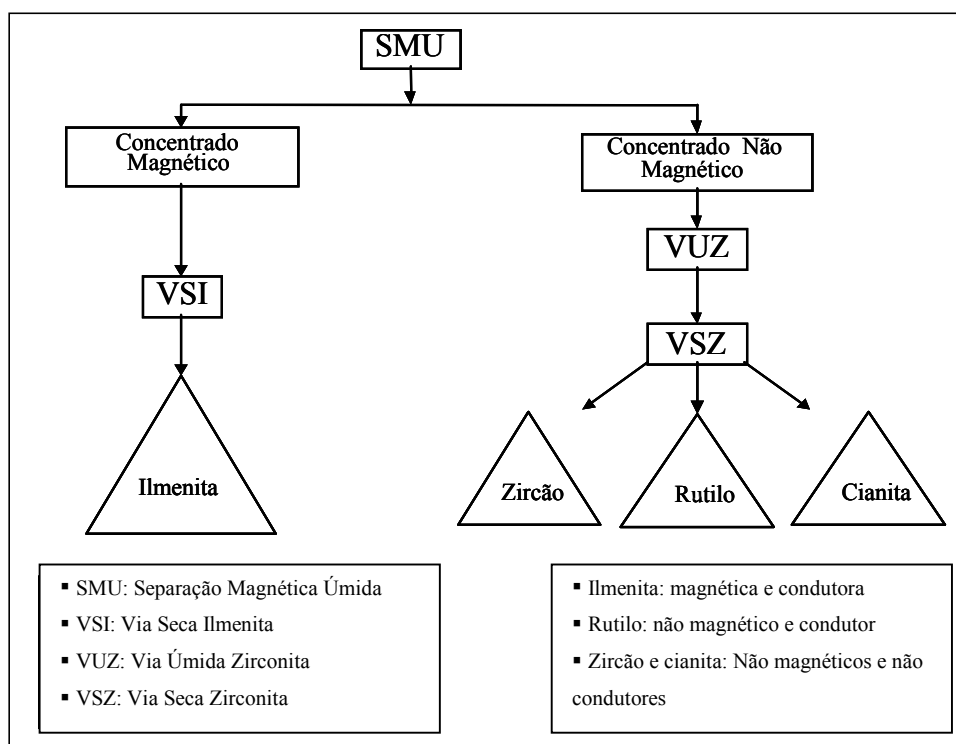


Figura 3. Fluxograma simplificado do processamento mineral na planta fixa.

Na figura 4 é mostrado o fluxograma da planta VSI em detalhes. Esta planta é alimentada pelo concentrado magnético, proveniente da SMU, através de uma esteira.

Primeiramente o concentrado magnético é secado por combustão através de um forno. Depois de seco, alimenta um ciclone, cujo underflow segue para dois distribuidores que alimentam os separadores eletrostáticos. No overflow sai um material muito fino que é expelido para a atmosfera.

Cada separador eletrostático gera um material condutor, semicondutor e não condutor. O material condutor segue para a pilha pulmão da ilmenita que é o concentrado final. O material semicondutor alimenta a próxima etapa que é realizada em separadores magnéticos terras raras e, esta etapa, acontece em dois estágios. No primeiro estágio é gerado um produto magnético que segue para a pilha pulmão do concentrado final de ilmenita e, o outro produto gerado, o não-magnético, alimenta o segundo estágio dos separadores magnéticos terras raras. Neste segundo estágio são gerados três tipos de concentrados tais como magnéticos, semimagnéticos e não-magnéticos. Os concentrados magnéticos e semimagnéticos seguem para duas mesas vibratórias da planta VUZ, a fim de recuperar a ilmenita perdida na VSI. Já o concentrado não-magnético, juntamente com o material não-condutor gerado nos separadores eletrostáticos, alimentarão um separador eletromagnético, que é a próxima etapa da planta VSI, também, realizada em dois estágios. No primeiro estágio é gerado um concentrado magnético que também segue para as duas mesas da planta VUZ. No segundo estágio é gerado um concentrado não magnético, que segue para a pilha pulmão do concentrado não magnético da planta VUZ, e é também gerado um concentrado magnético, que é descartado como rejeito.

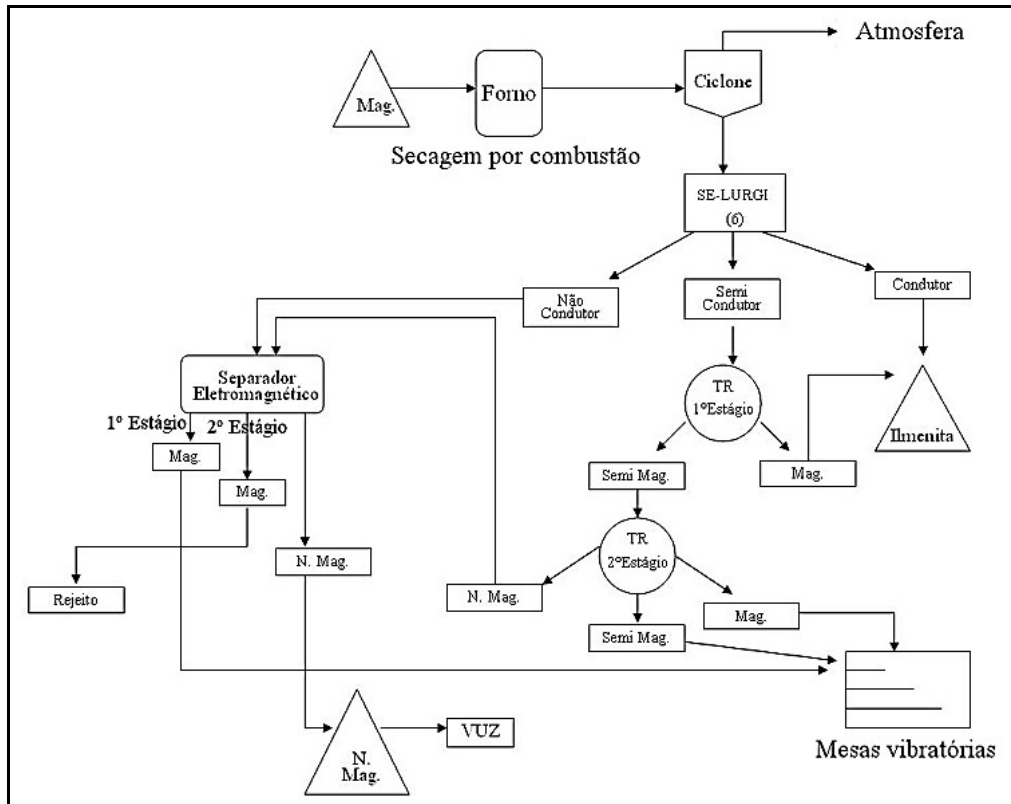


Figura 4. Fluxograma da planta VSI.

2.2 ESTADO DA ARTE DA ILMENITA

2.2.1 História

O nome ilmenita provém do seu local de descoberta no lago Ilmen das Montanhas Ilmen em Miask, na porção sul da Cadeia de Montanhas Ural na Rússia. Desde a sua descoberta, o mineral ilmenita foi se destacando economicamente como minério de titânio. O titânio era pouco usado como metal e não se conhecia suas outras utilidades. A partir de 1946, o metal de titânio começou a ser produzido comercialmente. Antes disto, era considerado uma “curiosidade de laboratório” (Minerals Zone, 2006).

2.2.2 Mineralogia

A ilmenita é um óxido de ferro e titânio na forma cristalina, FeTiO_3 . Sua cristalografia é trigonal da classe romboédrica. Seu hábito é usualmente tabular, maciço, compacto, espesso, com planos basais acentuados e pequenas truncaduras romboédricas. Nas areias de praias é encontrada normalmente como partículas arredondadas com um diâmetro entre 0,1 e 0,2 mm. Seu brilho é metálico a submetálico e apresenta cor preta. Sua densidade relativa varia entre 4,5 a 5 e apresenta fraco magnetismo (Dana, 1969).

É comum a ocorrência de alteração da ilmenita e isto pode acontecer em três estágios sucessivos, tais como: ilmenita com manchas de alteração de óxido de titânio, ferro amorfo e leucoxeno. Este último é classificado muitas vezes como um mineralóide, sendo um produto de alteração de óxidos de Fe-Ti, principalmente da ilmenita, da qual uma porção do ferro tende a se lixiviar. Seus grãos apresentam cor marrom ou cinza com aspecto lustroso. Sua composição é similar a da ilmenita, mas enquanto esta apresenta teor aproximado de TiO_2 de 53%, o leucoxeno apresenta teor de TiO_2 acima de 68%. Não é uma espécie mineral de valor comercial e consiste principalmente de rutilo (TiO_2) e anatásio. Também se conhece leucoxeno composto por bruquita finamente dividida. O anatásio e a brookita são polimorfos do rutilo (Deer *et al*, 1966).

Um importante estudo de alteração da ilmenita através da lixiviação do ferro, resultando no enriquecimento em titânio, é apresentado por Lener (1997). Ele explica que durante o processo natural de intemperismo, a ilmenita perde ferro, enriquecendo

progressivamente em titânio. O resultado é um TiO_2 quase puro. Assim, foi observada, primeiramente, uma alteração ao longo das bordas do grão e depois, descontinuamente em seu interior. Lentes de hematita, quando presentes, são dissolvidas, em primeiro lugar, devido a sua alta solubilidade. As reações cinéticas envolvidas na alteração da ilmenita são lentas e os múltiplos estados de alteração são visíveis no grão. Ainda, são evidentes as mudanças na refletibilidade e na cor, e a susceptibilidade magnética vai diminuindo com o progresso da alteração. Com a perda de ferro na estrutura da ilmenita, os grãos tornam-se mais porosos.

Ainda de acordo com Lener (1997), por causa da natural gradação da lixiviação da ilmenita, são produzidas distintas fases minerais intermediárias entre ela e o rutilo, o que tornou a nomenclatura dos produtos da sua alteração uma fonte de controvérsias. Dentre elas, o pseudorutilo, cuja composição é representada por $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$, servindo, portanto, como um ponto de referência para a compreensão do processo de alteração da ilmenita. Segundo Temple *apud* Lener (1997), produtos de alteração com baixo Ti que não apresentam a composição de pseudorutilo devem simplesmente ser considerados como ilmenita alterada. Com a alteração contínua pela remoção do ferro e do oxigênio, remanentes da estrutura original da ilmenita, resultarão, eventualmente, num TiO_2 mais puro. Assim, o termo leucoxeno, cuja composição é caracterizada como $\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_{3+x}\text{O}_{9+x/2}$, onde $x \leq 2$, apresentando densidade relativa entre 3,9 e 4,2, foi empregado para estes produtos de alteração com alto teor em Ti.

Outro mineral observado em alguns estudos é a arizonita, caracterizado por $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2$, que é considerado uma mistura de hematita, ilmenita, anatásio e rutilo (Overhold *et al*, *apud* Lener, 1997).

Chernet (1999) também mostrou um estudo de alteração progressiva da ilmenita para leucoxeno. O concentrado analisado é proveniente das areias da Austrália, sendo composto predominantemente de ilmenita e seus produtos de alteração, além de misturas de várias fases que estão presentes na maioria dos grãos liberados. Foi observado que a mudança de alteração da ilmenita é direta, ou através de produtos intermediários, para leucoxeno, que é compreendido como um grão liberado de rutilo secundário ou agregados de grânulos finos de cristais de rutilo misturados com impurezas (silicatos, óxidos, elementos traços, etc.), exibindo, ainda, reflexões internas abundantes, mudanças de cor parda à branca com o decréscimo em teor de ferro. Os testes realizados mostraram que o concentrado em estudo

contém seis fases estáveis e metaestáveis relacionadas ao TiO_2 : ilmenita, ilmenita alterada, pseudorutilo, pseudorutilo alterado, rutilo secundário (leucoxeno) e rutilo primário.

Segundo Maia (2001), o leucoxeno é reconhecido como um rutilo ou anatásio em granulometria muito fina, ou mistura dos dois com material amorfo. É um produto de alteração contendo geralmente acima de 60% de TiO_2 e ocorre com titanita, ilmenita, perovskita (CaTiO_3 – mineral isométrico) ou outros minerais de titânio.

De acordo com Tyler & Marsden (1938), o leucoxeno é um produto de alteração de minerais de titânio, estando relacionado ao intemperismo de rochas ígneas e sedimentares, mas também em rochas ígneas mais recentes, a qual deve ter se formado como resultado de alteração hidrotermal. Pequenos cristais de magnetita associados com leucoxeno indicam que sob certas condições a ilmenita pode se decompor em magnetita e microcristais de TiO_2 (leucoxeno) na forma de rutilo, anatásio ou bruquita.

2.2.3 Composição química

A composição da ilmenita é em torno de 53% de TiO_2 e 47% de FeO (considerada com estes valores uma ilmenita pura). Pela introdução do óxido férrico, a relação entre o titânio e o ferro pode variar amplamente. O óxido férrico em excesso pode ser devido largamente a inclusões minúsculas de hematita (Fe_2O_3). Além disso, o magnésio e o manganês podem substituir o ferro ferroso (Dana, 1969).

De acordo com Deer *et al.*, (1966), a fórmula da ilmenita pode ser representada de uma forma mais completa como sendo $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{TiO}_3$, tendo apenas pequenas quantidades de Mg e Mn. A *crichtonite* é uma espécie distinta que contém não só Fe^{3+} como Fe^{2+} e ainda Ti a mais que a ilmenita. Embora as ilmenitas naturais possam conter até cerca de 6% de Fe_2O_3 , em solução sólida, podem também estar presentes lamelas de exsolução de hematita ou de titano-hematita.

Para Maia (2001), a ilmenita pode conter pequenas quantidades de magnésio e manganês e, em muitos casos, até 6% em peso de Fe_2O_3 .

No estudo de Greeley (1982), a ilmenita exhibe vários graus de alteração de TiO_2 , como o resultado da oxidação e lixiviação preferencial do ferro, apresentando, assim, cerca de 48 % de TiO_2 nas ilmenitas essencialmente inalteradas do sul da África e, 61 a 64 % de TiO_2 nas ilmenitas da Flórida e Nova Jersey. Nas areias das praias mais antigas há um elevado percentual de TiO_2 , cerca de 70%, principalmente acima do lençol d'água, consistindo quase que inteiramente de leucoxeno.

2.2.4 Geologia

A ilmenita é freqüente como mineral acessório em muitas rochas eruptivas e metamórficas e também pode ocorrer em filões ou em massas disseminadas, por vezes de grande extensão, em associação com gabros, noritos, anortositos, etc. É um dos primeiros constituintes do magma a cristalizar, mas, como regra geral, as jazidas magmáticas importantes de ilmenita encontram-se em rochas ricas em piroxênios e não em olivina, e freqüentemente o piroxênio que está associado é um ortopiroxênio. Nas rochas metamórficas encontra-se em muitos ortognaisses e principalmente nas rochas das fácies granulíticas. A ilmenita é um mineral que se encontra em todos os sedimentos detríticos e que pode formar concentrações em areias de praia conhecidas como depósitos de areias pretas (Deer *et al*, 1966); é comum a sua associação com a magnetita, o rutilo, o zircão e a monazita (Dana, 1969).

Segundo o estudo de Greeley (1982), existem três tipos principais de depósitos de ilmenita, sendo eles: pláceres marinhos e de rios, depósitos maciços de minérios de ferro titaníferos e complexos ígneos máficos. Nos pláceres marinhos e de rios é comum a ilmenita estar associada com o rutilo e outros minerais pesados, tais como a magnetita, a monazita, a granada, a estauroлита e a silimanita. Por causa de suas durezas relativamente altas (5 a 6,5 na escala *Mohs*) e resistência química ao intemperismo, a ilmenita e o rutilo tendem a sobreviver a vários processos geológicos, desde a erosão das rochas fonte até a separação natural dos minerais mais pesados pelo movimento das águas e se concentrando, assim, em depósitos de plácer.

Nos depósitos maciços de minérios de ferro titaníferos, Greeley (1982) indica que são conhecidos em inúmeros países cujo valor comercial não depende somente do teor de

titânio, mas também do grau de liberação do mineral. Dentre eles estão os depósitos em Nova York, Canadá, Finlândia e Noruega.

Nos complexos ígneos máficos, Greeley (1982) indica os depósitos de Arkansas e Virgínia nos EUA e os depósitos do Canadá e México.

2.2.5 Principais ocorrências

As reservas mundiais de ilmenita, em termos de dióxido de titânio contido, alcançaram 1,4 bilhões de toneladas, em 2004. China, Austrália e África do Sul assumem lugares de destaque. Há certos minerais, como os das reservas do Canadá, África do Sul e Noruega que, após tratamento metalúrgico, resultam no que se chama escória titanífera (*slag*), que possui alto teor de TiO₂ (Maia, 2005), conforme mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Reservas e produção mundial do concentrado de ilmenita, em 2004.

Países	Reservas ⁽¹⁾		Produção ⁽¹⁾	
	(t)	(%)	(t)	(%)
Brasil	8.331.000	0,3	130.000	2,7
China	350.000.000	24,9	410.000	8,4
Vietnã	5.900.000	0,4	100.000	2,1
África do Sul ⁽²⁾	220.000.000	15,7	1.130.000	23,3
Austrália	250.000.000	17,8	1.090.000	22,4
Canadá ⁽²⁾	36.000.000	2,6	720.000	14,8
Estados Unidos	59.000.000	4,2	300.000	6,2
Índia	210.000.000	14,9	250.000	5,1
Noruega ⁽²⁾	60.000.000	4,3	350.000	7,2
Ucrânia	130.000.000	9,3	290.000	6,0
Outros países	78.000.000	5,6	90.000	1,8
Total	1.407.231.000	100	4.860.000	100

Fontes: DNPM-DEM, *Mineral Commodity Summaries* - 2005.

Nota: Dados estimados em TiO₂; (1) Dados em concentrado; (2) Refere-se a Ilmenita e *slag*.

As reservas de titânio no Brasil se encontram na forma de anatásio, ilmenita e rutilo. Os depósitos mais importantes de ilmenita situam-se no Estado da Paraíba (Mataraca), representando 64% das reservas brasileiras (DNPM, 2005).

Na tabela 2 são mostradas as principais reservas brasileiras de ilmenita, distribuídas nos Estados de Bahia, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Rio de

Janeiro e Santa Catarina. Para cada Estado citado constam as reservas medidas, indicadas, inferidas e lavráveis, bem como a quantidade de TiO_2 contido, em toneladas.

Tabela 2. Reservas minerais brasileiras de ilmenita com TiO_2 contido, em 2004.

Unidades da Federação	Reservas				Lavrável	
	Medida		Indicada	Inferida	Minério (t)	TiO_2 Contido (t)
	Minério (t)	TiO_2 Contido (t)	TiO_2 Contido (t)	TiO_2 Contido (t)		
Bahia	10.349.998	2.586.498	16.540	-	10.349.998	2.586.498
Espírito Santo	924.821	123.974	-	-	924.821	123.974
Goiás	493.391	74.938	1.125	5.209	505.891	76.063
Minas Gerais	11.884.801	2.967.822	14.027.543	21.972.997	71.074.560	16.907.710
Paraíba	24.697.514	638.902	617.082	-	66.756.114	1.255.984
Pernambuco	1.934.847	475.076	-	-	1.222.009	312.834
Rio de Janeiro	1.044.059	110.622	-	-	1.044.059	110.622
Santa Catarina	3.382.000	1.352.800	1.800.000	2.000.000	6.300.000	2.520.000
Total	54.711.431	8.330.632	16.462.290	23.978.207	158.177.452	23.893.685

Fonte: DNPM - Anuário Mineral Brasileiro - 2005.

Da produção comercial de minério de titânio, em 2004, 14% foram provenientes das Indústrias Nucleares do Brasil S.A. O restante foi proveniente da jazida de Mataraca, no Estado da Paraíba, através da própria Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S.A., que atualmente detém 16% do mercado mundial de dióxido de titânio, produzindo 54.000 t/ano em sua fábrica em Camaçari-BA, correspondendo a 62% do mercado brasileiro, dos quais apenas 5.000 t/ano são exportadas, e a Dupont do Brasil S.A., em Uberaba, no Estado de Minas Gerais, o restante (Maia, 2005).

Da produção doméstica de metais à base de titânio nos Estados Unidos, 55% foi usada em aplicação aeroespacial, geração de força, etc. A ilmenita supre 90% da demanda mundial por minérios de titânio. Os recursos mundiais identificados de rutilo (incluído anatásio) totalizam cerca de 230 milhões de toneladas de TiO_2 contido. No futuro, poderão ser desenvolvidos processos comerciais para uso de concentrados dos minerais anatásio e perovskita (Maia, 2005).

2.2.6 Métodos de lavra

Os depósitos de interesse econômico, na maioria dos países produtores, são pláceres de praias e são explorados em uma diversidade de locais nas linhas de costa e plataformas continentais em todo o mundo. A exploração dos pláceres, devido à natureza física desses

depósitos, é feita normalmente por pás-carregadeiras, ou através de sucção hidráulica. Neste último caso, os sedimentos superficiais são removidos até que seja atingido o lençol freático, criando-se um grande lago onde é instalada uma unidade de dragagem. O material dragado é despejado diretamente nos concentradores por gravidade (espirais de Humphreys) que fazem a pré-concentração do material antes de ser encaminhado para a usina para posterior re-concentração e processamento (Silva, 2000).

Ainda, conforme Garnett *apud* Silva (2000), a exploração dos minerais pesados, feita por dragagem, pode ser hidráulica ou mecânica. Imensas dragas mecânicas, com caçambas com capacidade para 850 litros foram utilizadas na exploração de ouro no Alaska, posteriormente substituídas por um trator submarino operado remotamente a partir de um cabo ligado ao navio. Este veículo, que pesava 25 toneladas, era equipado com uma imensa draga hidráulica com capacidade para sucção de sólidos de até 250 mm de diâmetro, acionada por uma bomba d'água com capacidade de 9.690 litros/minuto. Jatos d'água sob forte pressão eram utilizados na boca da draga, para fragmentar os sedimentos semi-consolidados. A vantagem do trator submarino sobre a draga por caçambas foi a de proporcionar maior controle e seletividade quanto ao exato local a ser dragado, além de maior efetividade de dragagem, com taxas de 120 m³/hora em areias e 26 m³/hora em cascalho em profundidades médias de 15 metros.

Segundo o *Public Affairs Branch* (1996), os métodos de lavra utilizados para a exploração de *mineral sands* são moderadamente simples, existindo três tipos principais, tais como: sucção com dragagem, da mesma forma que é feito na maioria dos países produtores, já que a natureza física dos depósitos com quantidades mínimas de grãos grossos e de argilas favorece o seu uso (Sabedot, 2004). Neste método, a draga flutua numa lagoa artificial acoplada a uma planta de pré-tratamento utilizando equipamentos gravitacionais; lavra mecanizada a seco onde são utilizados *scrapers* e *bulldozers*. O minério trazido da mina passa por uma etapa de peneiramento a fim de separar grãos menores que 2 mm, para depois serem processados numa série de espirais concentradoras, visando a remoção de rejeito e excesso de lama; uma técnica de mineração hidráulica cujo corpo de minério é lavado com jato d'água. A polpa formada é bombeada para um concentrador a úmido, o qual separa os minerais de valores do rejeito.

Práticas modernas de mineração tendem a favorecer operações de lavra mecanizada a seco em relação às de dragagem, devido ao advento de processos de separação dos minerais por meio de separadores eletrostáticos.

2.2.7 Tratamento de minério ROM

As operações de tratamento de minério ROM destes depósitos são similares pelo mundo afora. As diferenças relacionam-se às características mineralógicas dos depósitos, peculiares em cada jazida (Garnar *apud* Sabedot, 2004).

Para a primeira etapa de separação entre os minerais pesados e o quartzo, principalmente, e de outros minerais leves, são utilizados processos gravimétricos. Assim, segundo Pincock *et al.*, (2005), os minerais pesados são separados através de uso de cones, espirais e mesas vibratórias. Frequentemente a areia contém grãos cobertos com impurezas que requer uma atrição com soluções químicas, tais como soda cáustica para a próxima etapa de separação, que é a separação dos minerais pesados entre si. Esta etapa é realizada a seco utilizando separadores eletrostáticos de alta tensão e, também, separadores magnéticos com diferentes intensidades.

Muitas vezes no estágio inicial de separação é utilizada uma etapa de peneiramento, a fim de eliminar frações mais grossas que tenham baixa concentração e também rejeitos como cascalhos, entre outros.

De acordo com Best (2006), após a primeira etapa de separação proveniente das espirais concentradoras, que geram um pré-concentrado rico em minerais pesados, é feita a separação dos minerais magnéticos (ilmenita) dos não magnéticos (rutilo e zircão). Esta etapa é realizada a úmido, assim como acontece na Millennium, na SMU (Separação Magnética Úmida). A etapa posterior é então realizada a seco, já que são utilizados separadores eletrostáticos.

Segundo o *Public Affairs Branch* (1996), as plantas de tratamento de minerais pesados são separadas a úmido e a seco. A primeira etapa de concentração é na planta a úmido, onde são utilizados cones e espirais concentradoras, formando uma pilha de pré-concentrado de

minerais pesados que alimentarão a planta a seco, composta por um forno e separadores magnéticos e eletrostáticos.

Na concentração de areias pesadas, espirais concentradoras representam o principal aparelho usado na obtenção do pré-concentrado de minerais pesados, na qual são usadas em múltiplos estágios de separação. Após secagem, este pré-concentrado é sujeito à separação sucessiva por métodos gravimétricos, elétricos e magnéticos (Sampaio & Tavares, 2005).

2.2.8 Principais usos

A ilmenita é a principal fonte de matéria-prima para obtenção de dióxido de titânio – TiO_2 e também para ligas de ferro titânio. O TiO_2 fabricado a partir da mesma tem sido usado em quantidades cada vez maiores como pigmento (pigmento branco), na fabricação de tintas, papel, borracha, plásticos, cerâmicas, cosméticos, etc., em substituição aos pigmentos mais antigos, notadamente os compostos de chumbo, devido a sua extrema brancura e elevada reflectância (Ré & Marques, 2002).

Conforme Maia (2001), o maior emprego dos pigmentos de dióxidos de titânio (cerca de 50%) é na fabricação de tintas e vernizes devido ao seu alto índice de refração, opacidade, poder de encobrir imperfeições das superfícies, onde são aplicadas, inércia química e toxicidade nula. O segundo maior campo é na indústria de papel, na fabricação de papel fotográfico e de todo tipo de papel para impressão, exceto jornal. Outras grandes aplicações são na indústria de plásticos, borrachas para pneus, esmaltes para porcelanas, encerados, revestimentos de paredes e fibra de vidro.

Ainda estão sendo realizadas muitas pesquisas sobre o uso do titânio metálico como material de estruturas que, por causa do seu valor elevado da relação resistência com o seu peso, está provando ser um material desejável para a construção aeronáutica tanto em estruturas quanto em motores (Dana, 1969). Além disso, esse minério tem sido utilizado como agente aditivo na composição de abrasivos, na fabricação de esmaltes matizados, nas cargas de altos fornos para melhorar o fluxo metálico e proteger o revestimento refratário, bem como em revestimentos de eletrodos utilizados em solda elétrica (INB, 2005).

2.2.9 Mercado

A ilmenita supre cerca de 90% da demanda mundial de minerais de titânio (Gambogi, 2006) e cerca de 85% dos concentrados provenientes dos minérios de titânio são direcionados para a produção de dióxido de titânio. Os setores de tintas e vernizes (70%), plásticos (20%), celulose e outras aplicações (10%), constituem os consumidores da oferta de pigmentos de titânio no país. Os 15% restantes do concentrado são utilizados na fabricação de titânio metálico, eletrodos, soldas e outros (Maia, 2005).

A distribuição no Brasil do mercado consumidor de titânio (produto beneficiado) está representada pelos Estados de São Paulo (73,57%), Minas Gerais (4,35%) e Rio de Janeiro (0,17%). O mercado externo representa 20,72% do consumo de titânio e o restante (1,19%) é caracterizado como não informado (DNPM, 2005).

O preço internacional do concentrado de ilmenita é cotado com base no mercado australiano, em decorrência de a Austrália ser o maior produtor mundial deste mineral. O teor médio de comercialização é de 54% de TiO_2 . No Brasil, o preço da ilmenita foi estabelecido com base nos custos de produção da INB (Indústrias Nucleares do Brasil S.A), já que a produção da Millennium, maior produtora, é quase totalmente transferida para a sua própria unidade de transformação (Maia, 2001).

Entre os anos de 1988 e 2000 houve uma constante dependência do mercado externo do confronto consumo-produção de ilmenita. No ano de 1989, deixou-se de importá-la, cuja produção interna passou a ser suficiente para o consumo nacional (Maia, 2001).

A tabela 3 mostra a quantidade e o valor da produção comercializada de titânio, proveniente da ilmenita, no Brasil, com as principais empresas produtoras, no ano de 2004.

Tabela 3. Valor da ilmenita beneficiada (TiO₂) e as principais empresas produtoras.

Beneficiada		Empresa Produtora
Quantidade (t de TiO ₂)	Valor (R\$)	
13.191	13.132.374	Titânio Goiás Mineração Indústria e Comércio LTDA. (GO)
64.741	18.293.303	Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S.A. (PB)
6.019	1.637.090	Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (RJ)
83.951	33.062.767	Total

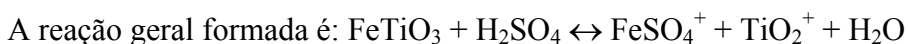
Fonte: DNPM - Anuário Mineral Brasileiro – 2005, modificado.

A importação de bens primários de titânio no ano de 2004 representou aproximadamente 91% da realizada no ano de 2003, sendo a África do Sul o maior fornecedor com 92%, seguido do Canadá com 32%, a um preço médio de US\$ 1.600/t FOB (valor do FOB: US\$ 1.000,00). Com relação às ligas à base de titânio, verificou-se um aumento nas importações de apenas 8% em relação ao ano de 2003, sendo a Rússia o maior fornecedor com 63%. Os compostos químicos tiveram um aumento de 20% nas importações, sendo 45% proveniente dos Estados Unidos e 25% do México. Já as exportações brasileiras dos produtos de titânio tiveram um acréscimo da ordem de 18% em relação ao ano de 2003, totalizando 9.649 t no valor de 18 milhões de dólares. Os compostos químicos representam praticamente 100% dos produtos exportados, sendo a Argentina responsável por 54% (Maia, 2005).

2.2.10 Produção de pigmento de dióxido de titânio

O pigmento branco de dióxido de titânio é extraído da ilmenita (45-70% TiO₂) e rutilo (92%-96% TiO₂), através de dois diferentes processos comerciais, tais como: “processo sulfato” e “processo cloreto”, chamado também de sulfatação e cloritização, respectivamente. Cerca de 92% dos minerais de titânio do mundo são utilizados para fazer pigmento. Os três maiores produtores de pigmento são a DuPont, Millennium e Tioxide (Best, 2006).

O processo sulfato é o mais antigo e utiliza a ilmenita como matéria-prima ou escória titanífera (*slag*). A ilmenita é dissolvida em ácido sulfúrico sendo removida uma porção do sulfato de ferro formado; o hidróxido de titânio é precipitado por hidrólise, filtrado e calcinado (Maia, 2001).



O processo cloreto é o mais recente e utiliza o rutilo como matéria-prima ideal, podendo utilizar o rutilo sintético, a escória titanífera e o anatásio como opções. A ilmenita não pode ser utilizada como matéria-prima porque a quantidade de TiO_2 é baixa, ou seja, este processo é inadequado para teores de TiO_2 abaixo de 85%, a fim de minimizar perdas de cloro no subproduto cloreto de ferro (Maia, 2001; Best, 2006; Nexant, 2006). O rutilo sintético é produzido da ilmenita utilizando o processo *Becher*, que reduz o óxido de ferro contido na ilmenita para ferro metálico e então o re-oxida para óxido de ferro e no processo separa o dióxido de titânio como rutilo sintético com 91 a 93% de TiO_2 (Best, 2006).

A alteração da ilmenita para o leucoxeno tornou-se algo de extrema importância na aplicação da metalurgia para a produção de pigmentos, pois a ocorrência do leucoxeno dificulta a lixiviação com o ácido sulfúrico. O objetivo deste ácido é transformar o ferro presente na ilmenita em uma solução aquosa de sulfato ferroso, a fim de separar o TiO_2 para o pigmento. O ácido reage com o Fe^{2+} da ilmenita e não com o Fe^{3+} presente no leucoxeno. Com isto, muito leucoxeno segue para a bacia de rejeito sem se solubilizar com o ácido sulfúrico, além disso, uma outra parte entra no pigmento, contaminando-o. Este problema vem sendo enfrentado pela Millennium em Camaçari, na Bahia, onde é feita a produção de pigmento de tinta a partir da ilmenita.

2.3 A MONAZITA

A monazita é um mineral comparativamente raro que ocorre de maneira acessória em granitos, gnaisses, aplitos e pegmatitos, e nos sedimentos resultantes da erosão dessas rochas. Concentra-se em depósitos do tipo pláceres e, por apresentar alta densidade relativa (entre 5 a 5,3) está associada com outros minerais pesados, como a magnetita, a ilmenita, o rutilo e o zircão (Dana, 1969).

Ainda conforme Dana (1969), é rara a formação de cristais de monazita, sendo usualmente grãos pequenos e achatados. É comum apresentar hábitos prismáticos e granulares.

O seu grupo estrutural é constituído por arsenatos, fosfatos e silicatos monoclínicos de fórmula geral ABO_4 ($\text{A}=\text{Bi, Ca, Ce, La, Nd, Th, U}$; e $\text{B}=\text{As, P, Si}$). Dentro desse grupo, o

fosfato monazita é o mais comum mineral de Elementos Terras Raras (ETR) (Toledo *et al*, 2004).

A principal característica da monazita é ser o principal mineral fonte do óxido de tório, contendo-o em quantidades que variam entre 1 e 20%; a monazita comercial contém, usualmente, entre 3 e 9% desse óxido (Dana, 1969).O tório é um elemento radioativo e é muito utilizado como combustível de reatores nucleares.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O concentrado analisado, enviado pela empresa Millennium, foi proveniente da pilha pulmão do concentrado final de ilmenita da Planta Via Seca Ilmenita (VSI), contendo, em média, teor de TiO_2 de 54%.

As amostras enviadas foram quarteadas a aproximadamente 2,5 kg para a realização das seguintes atividades: caracterização granulométrica e da composição mineralógica do concentrado de ilmenita e análise da presença de inclusões de monazita e outros contaminantes na ilmenita.

3.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Fez-se uma análise granulométrica a fim de se obter o tamanho médio da ilmenita no concentrado. Cerca de 100 gramas do concentrado foram passadas nas frações 65, 80, 100, 115, e 150 *mesh*, equivalentes, respectivamente, a 0,21, 0,177, 0,149, 0,125 e 0,105 mm. Foram realizados três peneiramentos para se obter uma média do tamanho dos grãos de ilmenita.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Para a caracterização da composição mineralógica do concentrado de ilmenita, foi utilizada uma lupa binocular com um aumento de 32 vezes. Fez-se a contagem dos grãos presentes, em uma lâmina de vidro, identificando-os e quantificando-os, em toda a área limitada deste aumento. Foram utilizadas, para esta análise, cinco amostras, e os resultados referem-se à média das mesmas.

3.3 ANÁLISE DE INCLUSÕES

Na análise da presença de inclusões nos grãos de ilmenita, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS), um da marca PHILIPS, modelo XL20 do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS e outro da marca JEOL, modelo JSM5800 do Centro de Microscopia

Eletrônica (CME), também da UFRGS, para permitir a determinação de elementos químicos na amostra. Por isso serão apresentadas imagens diferenciadas dos grãos e dos espectros.

Para este procedimento foram feitos embutimentos de aproximadamente 0,3 gramas dos grãos de ilmenita, com o objetivo de analisar o interior do grão.

Para o embutimento correspondente, foi utilizada uma resina epóxi de ARALDITE XGY 1109. Para promover o endurecimento da mesma, foi utilizado um catalisador (poliamina formulada) denominado de ARADUR 53 SBD. A proporção utilizada foi de duas partes de resina para uma parte do catalisador. Este procedimento foi realizado à temperatura ambiente.

Para os moldes do embutimento foram utilizados anéis cortados de tubos de PVC com diâmetros de 3 cm. Optou-se por este material porque a resina não adere ao plástico e é facilmente removível. Depois de secas e destacadas, as amostras foram lixadas e polidas para expor a face interna do grão e obter uma superfície plana para melhor visualização no MEV. Não há restrições quanto à forma da amostra.

As amostras foram recobertas com uma fina camada de material condutor, utilizando-se carbono. O carbono apresenta um único pico no espectro de EDS, interferindo, assim, muito pouco nas microanálises. O carbono puro é leve e, portanto, não inibe a resposta do detector de elétrons retro-espalhados. Também foi utilizado ouro para recobrir as amostras, que é o melhor condutor de elétrons, gerando imagens de melhor resolução e de maior magnificação. No entanto, inibe, parcialmente, a resposta do detector de elétrons retro-espalhados, e os seus muitos picos no espectro de EDS podem atrapalhar as análises qualitativas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Os resultados das análises granulométricas do concentrado de ilmenita são mostrados na tabela 4.

Tabela 4. Distribuição granulométrica do concentrado de ilmenita.

Abertura (mm)	Amostra 1 (% retido simples)	Amostra 2 (% retido simples)	Amostra 3 (% retido simples)	Média (%)
+0,21	7,25	7,86	7,4	7,5
-0,21 +0,177	12,99	12,24	14,18	13,1
-0,177 +0,149	22,76	24,08	22,2	23
-0,149 +0,125	26,89	26,63	27,34	27
-0,125 +0,105	4,13	4,18	4,42	4,2
-0,105	25,98	25	24,46	25,1

Os dados da tabela 4 mostram que os grãos de ilmenita concentram-se entre as frações $-0,177$ e $+0,125$ mm, constituindo 50% da amostra.

A faixa granulométrica, a qual se encontram os grãos de ilmenita, é bastante pequena, o que pode dificultar a remoção de inclusões de monazita ou outro contaminante, se forem identificadas.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Na figura 4 mostra-se uma foto do concentrado de ilmenita, vista em lupa com aumento de 50 vezes.



Figura 5. Concentrado de ilmenita observada em lupa.

Os resultados da composição mineralógica do concentrado da ilmenita são mostrados na tabela 5.

Tabela 5. Composição mineralógica do concentrado de ilmenita.

Mineral	Composição (%)
Ilmenita	95,3
Leucoxeno	3,36
Estauroлита	0,2
Turmalina	0,08
Zircão	0,17
Monazita	0,1
Rutilo	0,08
Cianita	0,02
Outros	0,69
TOTAL	100

Os principais minerais encontrados, além da ilmenita e seu produto alterado - o leucoxeno - foram a estauroлита, a turmalina, o zircão, a monazita, o rutilo e a cianita. Os minerais não identificados foram classificados como outros e, como era esperado com os dados da empresa, cerca de 98% de ilmenita é concentrada na etapa final (considerando ilmenita mais leucoxeno).

A presença de 3,36% de leucoxeno indica que a ilmenita está bastante alterada. Esta quantidade é devido, principalmente, a sua concentração de materiais condutores durante o primeiro estágio nos separadores eletrostáticos da planta VSI.

Na figura 5, o leucoxeno apresenta cores mais claras, resultado de sua cor original caramelizada e muitas vezes sem brilho, que o diferencia da ilmenita, que é preta e brilhosa. A diferença é bastante nítida, podendo ser facilmente identificada na lupa. Não tem como retirar o leucoxeno do concentrado porque mesmo sendo uma alteração da ilmenita, perdendo ferro e se enriquecendo em TiO_2 , continua mantendo suas propriedades magnéticas e eletrostáticas, seguindo normalmente no processo de concentração. A própria empresa Millennium descarta esta possibilidade e o leucoxeno é remetido como TiO_2 insolúvel para o processo de pigmento de tinta.

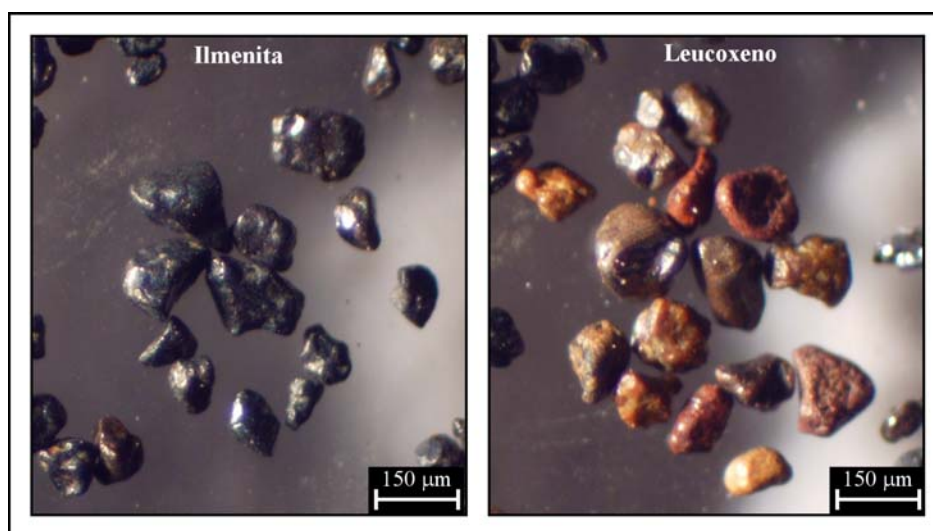


Figura 6. Grãos de ilmenita e de leucoxeno, em aumento de 80 vezes.

De acordo com a quantidade de monazita presente no concentrado final da ilmenita, sua concentração se dá, principalmente, durante o primeiro estágio nos separadores magnéticos da planta VSI, por ser um mineral fracamente magnético e, conseqüentemente, segue no processo com a ilmenita. Assim, pode-se afirmar que existe monazita liberada no concentrado final. Como não reage com o ácido sulfúrico no processo de lixiviação da ilmenita durante a produção de pigmento, parte vai para a bacia de rejeito e parte se incorpora no pigmento, contaminando-o.

Considerando estes problemas, existem certas exigências que precisam ser seguidas pela empresa em relação aos teores do concentrado final de ilmenita para a produção de pigmento. A tabela 6 mostra as principais substâncias analisadas e controladas deste concentrado. No caso de TiO_2 , é o teor mínimo exigido e no caso do P_2O_5 , é o teor máximo permitido.

Tabela 6. Principais substâncias controladas no concentrado de ilmenita para a produção de pigmento.

Substância	Quantidade (%)
TiO ₂	53
P ₂ O ₅	0,1

Como pode ser observado na composição mineralógica do concentrado de ilmenita, mostrada na tabela 5, a quantidade de monazita (P₂O₅) encontra-se dentro do limite permitido.

Uma ilmenita pura tem 52,5% de TiO₂ e 47,5% de FeO, totalizando 100% de FeTiO₃. Esta seria uma ilmenita ideal, mas dificilmente se consegue estes teores devido à presença de contaminantes e principalmente da oxidação do ferro, que reduz o FeO (denominado Fe⁺² e proveniente da ilmenita), para Fe₂O₃ (apresentando o Fe⁺³), que é a fórmula química que caracteriza o leucóxeno. Quanto mais FeO na amostra, maior é a quantidade de ilmenita e quanto mais Fe₂O₃ e TiO₂ na amostra, maior é a quantidade de leucóxeno. Assim, durante o processo de produção de pigmento com ácido sulfúrico (H₂SO₄), o Fe⁺² da ilmenita reage com o ácido, formando uma solução aquosa com o SO₄, denominado de FeSO₄ (sulfato ferroso) e o titânio presente reage com o sulfato formando TiOSO₄ (sulfato titanoso) que seguirá para as etapas finais do processo resultando num pó branco, fino e cristalino para o pigmento. Já o Fe⁺³ do leucóxeno não reage com o H₂SO₄ seguindo parte para a bacia de rejeito e parte no pigmento. Ainda são feitas as análises de TiO₂ insolúvel, que é proveniente do rutilo ou também do leucóxeno, e as análises de outros contaminantes, tais como Cr₂O₃, MnO, SiO₂, Al₂O₃, V₂O₅, ZrO₂ e CaO, que na maioria das vezes estão presentes na amostra e cujo controle é feito apenas para verificar o comportamento dos mesmos no concentrado.

Quando o concentrado de ilmenita é exportado, a exigência é que tenha até 0,05% de P₂O₅ devido à presença da monazita neste concentrado. Para obter esta redução, é realizado o controle da tensão e da vazão de alimentação nos separadores eletrostáticos na planta VSI. Para isto, a tensão é ajustada acima de 26 kv a fim de aumentar a separação da quantidade de material não condutor, já que a monazita não é condutora e a vazão da alimentação é diminuída. Assim, adquire-se um concentrado final de ilmenita mais puro. Em contrapartida perde-se, aproximadamente, 20% em rendimento deste concentrado. A faixa normal de operação dos separadores eletrostáticos para a produção diária do concentrado de ilmenita é de 25 kv de tensão.

Analisando ainda a tabela 5, existe pouca quantidade dos demais minerais presentes na amostra do concentrado final de ilmenita interferindo na separação, já que a eficiência dos separadores não é 100%.

4.3 ANÁLISE DE INCLUSÕES

Para as análises de inclusões nos grãos de ilmenita do concentrado final, foram visualizadas quatro amostras no MEV e analisadas com o EDS. Procurou-se fazer uma varredura em todos os grãos das amostras analisadas e, tanto na presença de vazios deixados pelas inclusões como também dos minerais presentes nas mesmas, foi utilizado o EDS.

Em todas as amostras apareceram poucos grãos, contendo pequenas quantidades de vazios deixados por inclusões arredondadas, conforme mostra a figura 7.

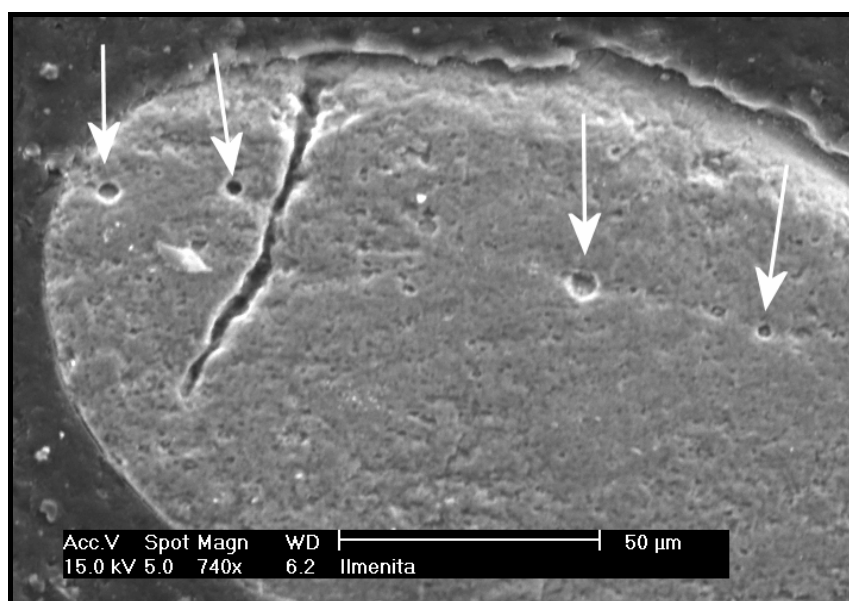


Figura 7. Imagem do MEV de vazios deixados por inclusões arredondadas em um grão de ilmenita.

O resultado da análise de um dos vazios deixados por inclusões (figura 7), através do uso do EDS, é mostrado na figura 8. O espectro desta análise apresenta elevados picos de ferro e titânio, identificando, assim, o mineral ilmenita. No mesmo espectro foi também observada a presença de manganês, o qual substitui o ferro ferroso da ilmenita, o que é comum. Através deste resultado pode-se concluir que não existe a presença de nenhum traço mineral da inclusão no vazio. Isto se deve, provavelmente, ao fato de que durante a

preparação das amostras, nas etapas de lixamento e polimento, os minerais destas inclusões poderiam ter sido arrancados. Neste mesmo espectro, são mostrados, também, pequenos picos de carbono, oxigênio e alumínio. A presença do carbono seria devido a sua utilização para tornar as amostras condutoras para a visualização no MEV. O oxigênio é um dos elementos que está presente na ilmenita, por isso a sua presença e a do alumínio pode ser de algum mineral contaminante, cujos traços tenham permanecido no vazio deixado pela inclusão. Foram observados, com frequência, pequenos picos de alumínio, nas análises com EDS, em outros vazios deixados por inclusões.

Ainda analisando os vazios deixados por inclusões da figura 7, o formato dos mesmos lembra a forma cristalina da monazita encontrada na jazida, mas mesmo se fosse detectada, é provável que sua presença não interferiria no resultado do teor final da ilmenita, porque seus tamanhos não são significativos, ou seja, com dimensões menores ou iguais a, aproximadamente, 10 μm . Outros grãos apresentaram, também, estes mesmos vazios e os resultados do EDS mostraram espectros semelhantes ao da figura 8. Além disso, as quantidades eram bastante insignificantes, o que não interferiria no resultado do teor do concentrado final de ilmenita.

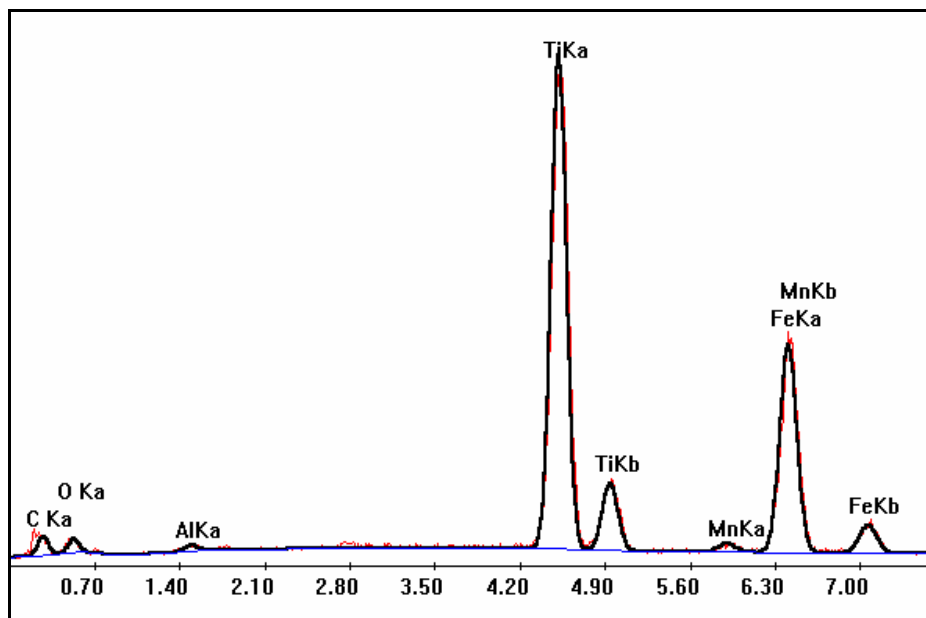


Figura 8. Espectro de um vazio deixado por inclusão mostrado na figura 7.

Nas amostras utilizadas para as análises no MEV, foram também observados diferentes vazios deixados por inclusões como aqueles vistos na figura 7. Nas figuras 9 e 10

são mostrados estes diferentes vazios deixados por inclusões, apresentando feições bem facetadas.

As análises com EDS dos vazios ilustrados nas figuras 9 e 10 mostraram, apenas, espectros com grandes picos de ferro e de titânio (composição da ilmenita), da mesma forma como aparece no espectro da figura 8. Estas inclusões poderiam ter sido arrancadas do grão durante as etapas de lixamento e polimento da amostra do mesmo modo como foi comentado dos vazios deixados por inclusões mostrados na figura 7.

A figura 9 mostra um vazio deixado por uma inclusão num grão de ilmenita, cujo formato lembra um prisma alongado, com uma dimensão superior a $20\ \mu\text{m}$ e, a figura 10, mostra um vazio de formato bipiramidal, lembrando a forma cristalina do zircão, com dimensão um pouco menor que $20\ \mu\text{m}$.

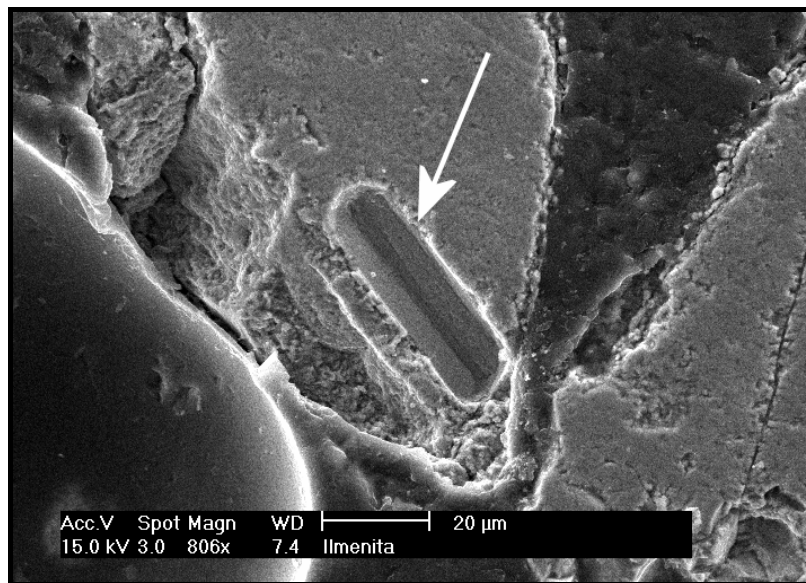


Figura 9. Imagem do MEV de um vazio deixado por inclusão alongada em um grão de ilmenita.



Figura 10. Imagem do MEV de um vazio deixado por uma inclusão bipiramidal em um grão de ilmenita.

Na figura 11 são mostrados três vazios deixados por inclusões, indicados pelos números 1, 2 e 3, com feições parecidas com o vazio deixado pela inclusão mostrada na figura 9 (forma prismática), com dimensão um pouco inferior a 50 μm e, cujas presenças são raras nos grãos observados das amostras de ilmenita.

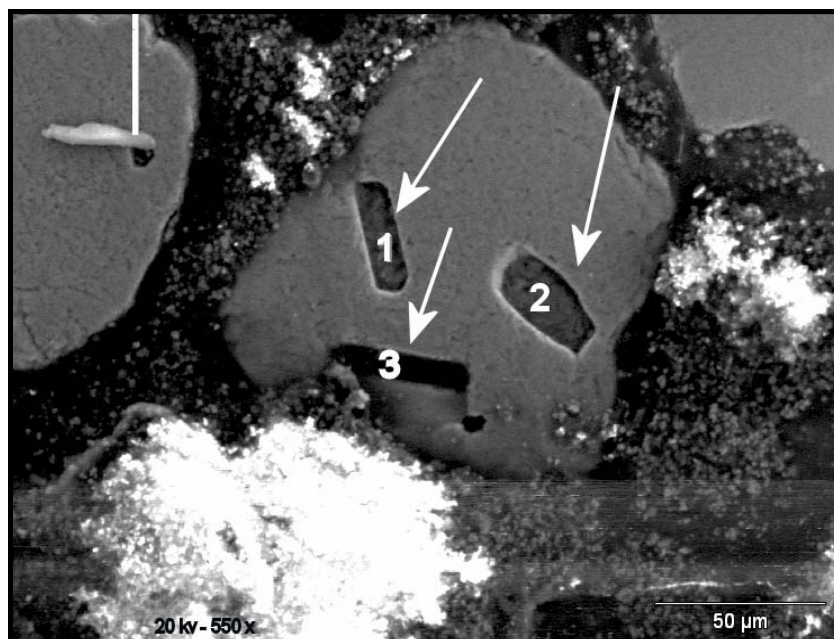


Figura 11. Imagem do MEV de três vazios deixados por inclusões alongadas em um grão de ilmenita.

Nas figuras 12 e 13 são mostrados os resultados do EDS, contendo os espectros dos vazios 1 e 2, respectivamente, da figura 11. Em ambas as figuras, são observados espectros semelhantes contendo grandes picos de alumínio e silício e, pequenos picos de ferro e titânio. Pelo resultado do EDS não são inclusões de monazita. Provavelmente, correspondem aos restos do mineral detectado e que tenham permanecido no vazio. São minerais contaminantes que provavelmente não interfeririam no resultado do teor final do concentrado de ilmenita. O resultado do EDS no vazio 3 não foi mostrado por apresentar somente picos de ferro e titânio, considerando assim, que nenhum traço mineral permaneceu neste vazio.

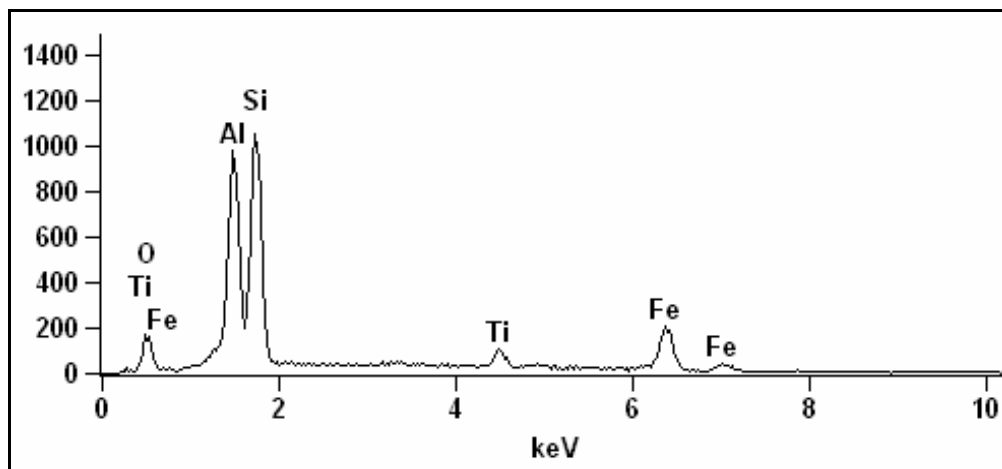


Figura 12. Espectro do vazio número 1 deixado por uma inclusão, mostrado na figura 11.

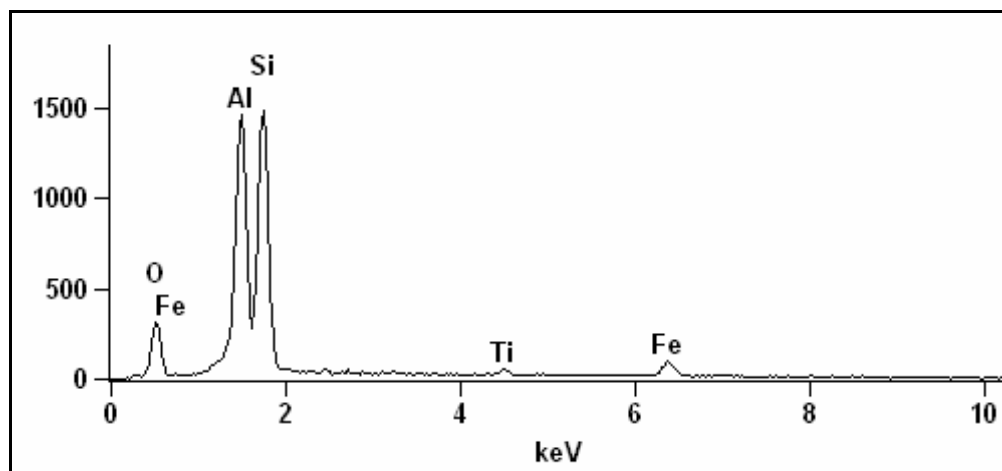


Figura 13. Espectro do vazio número 2 deixado por uma inclusão, mostrado na figura 11.

Na figura 14 é mostrado um grão de ilmenita com algumas inclusões de minerais contaminantes que não foram arrancadas no processo de preparação da amostra, razão pela qual foi dada especial atenção às inclusões indicadas pelos números 1 e 2.

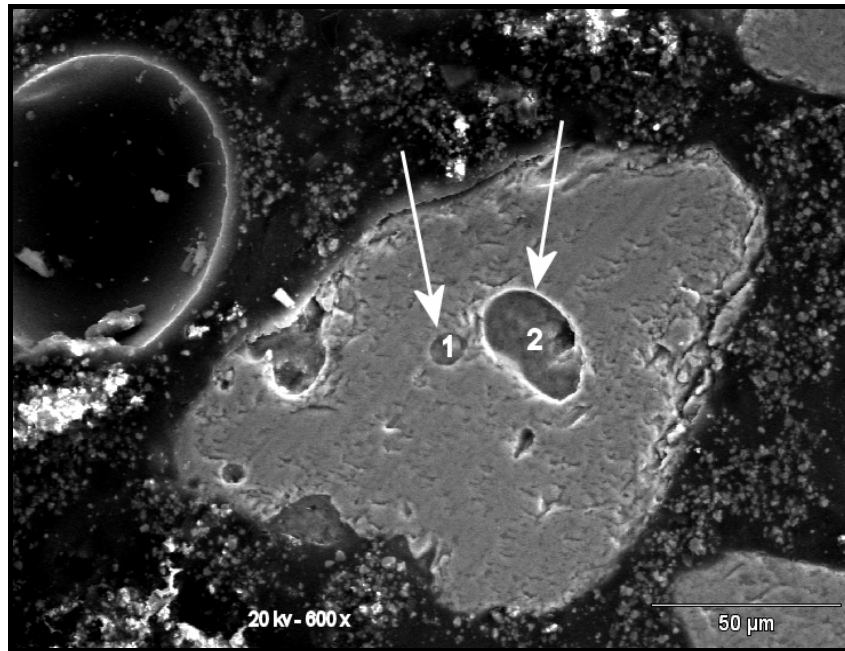


Figura 14. Imagem do MEV de duas inclusões (1 e 2) em um grão de ilmenita.

Na figura 15, pela análise com EDS, é mostrado o espectro da inclusão número 1, da figura 14, cujos picos indicam ser um mineral contaminante de fósforo e cálcio e, na figura 16, é mostrado o espectro da inclusão número 2, também, da figura 14, cujos picos indicam ser um mineral contaminante de alumínio e silício (elementos químicos bastante presentes nas inclusões observadas). Estas inclusões aparecem, também, com pouca frequência e suas presenças não afetam a característica da ilmenita.

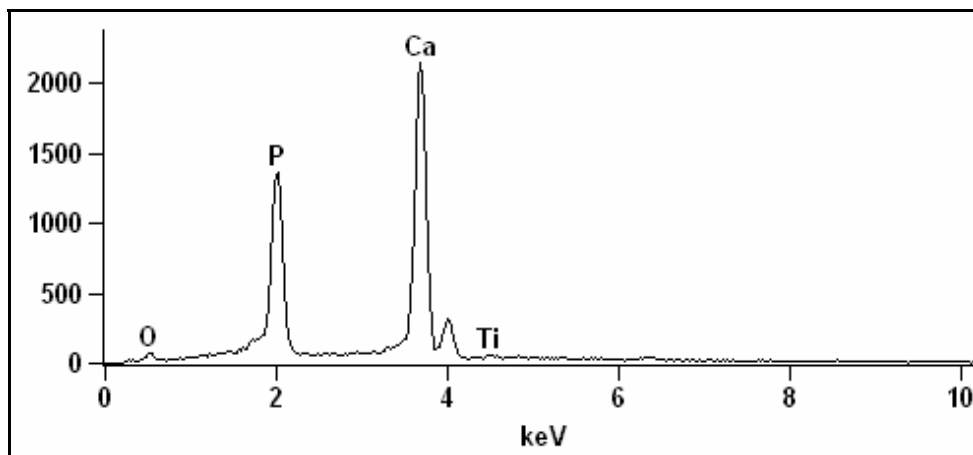


Figura 15. Espectro da inclusão de número 1 mostrada na figura 14.

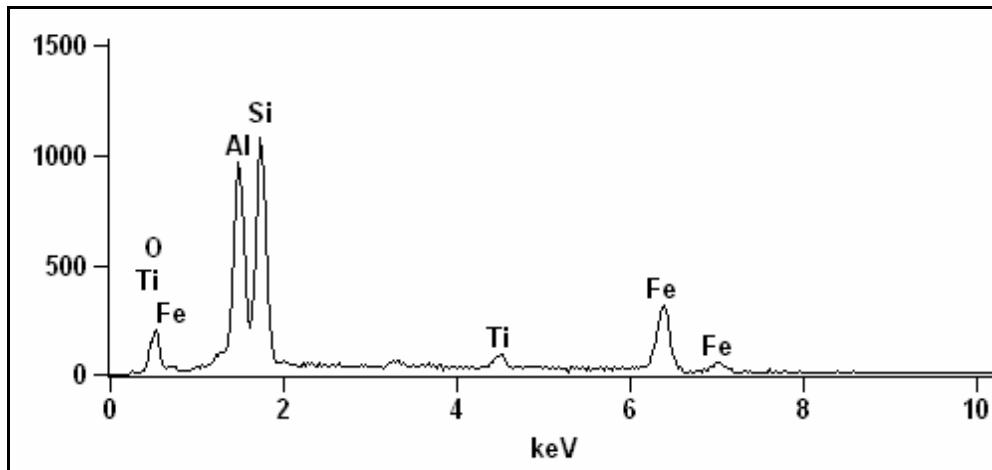


Figura 16. Espectro da inclusão de número 2 mostrada na figura 14.

Na figura 17 é mostrada uma inclusão, cujo mineral não foi arrancado do grão. O resultado da sua análise com EDS é ilustrado na figura 18, revelando a presença de zircônio, podendo caracterizar uma inclusão mineral de zircão. A dimensão da inclusão é inferior a 20 μm . Esta figura mostra que existem inclusões deste mineral, mas por serem raras não interfeririam no resultado do teor final do concentrado de ilmenita.

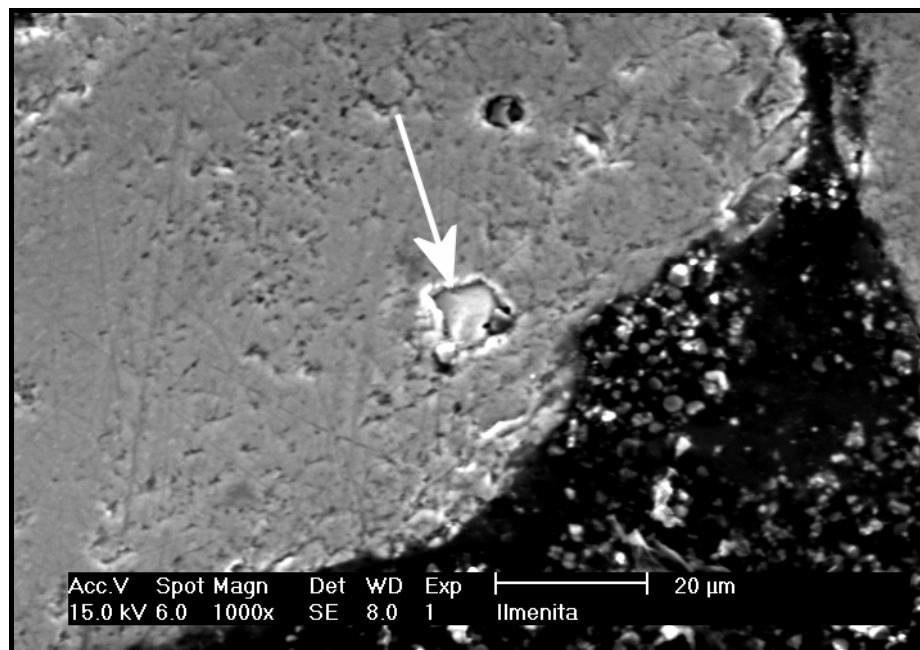


Figura 17. Imagem do MEV de provável inclusão de zircão em um grão de ilmenita.

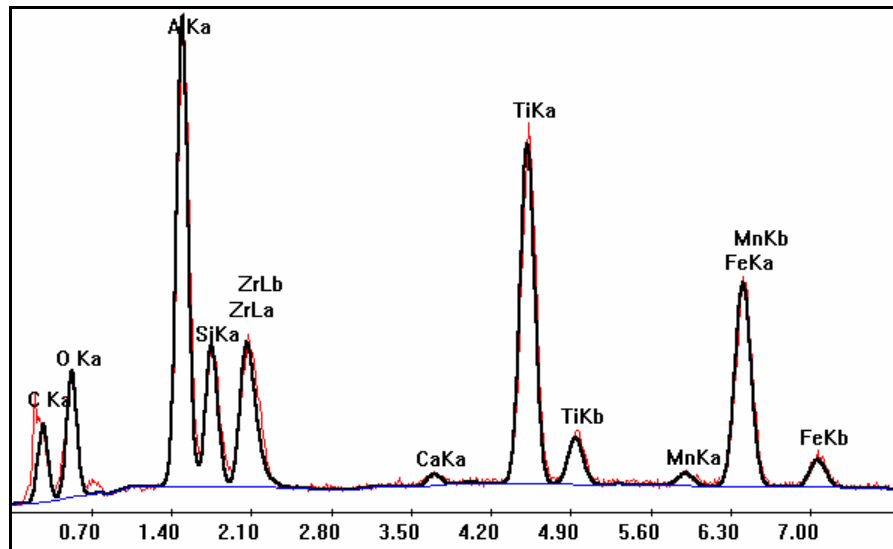


Figura 18. Espectro da inclusão mostrada na figura 17.

Consideráveis inclusões de quartzo foram encontradas em muitos grãos das amostras de ilmenita porque os picos dos espectros das análises com o EDS apresentaram somente os elementos químicos silício e oxigênio (composição química do mineral quartzo – SiO_2). Mas é importante salientar que este contaminante não interfere no resultado do teor final do concentrado de ilmenita.

Na figura 19 é mostrada uma grande inclusão de quartzo, cuja dimensão é superior a $50 \mu\text{m}$. Sua análise com EDS é ilustrada na figura 20, contendo apenas um grande pico de silício e um pequeno pico de oxigênio.

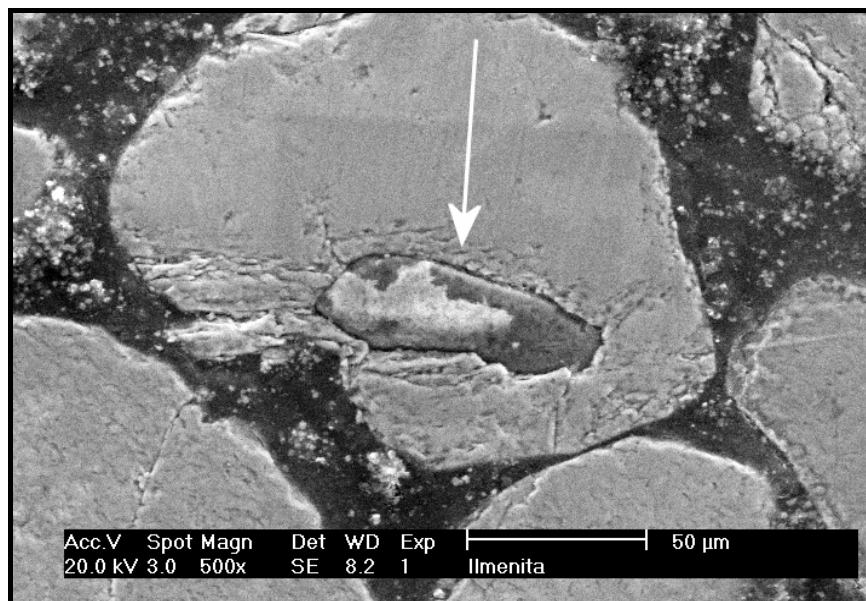


Figura 19. Imagem do MEV de uma inclusão de quartzo em um grão de ilmenita.

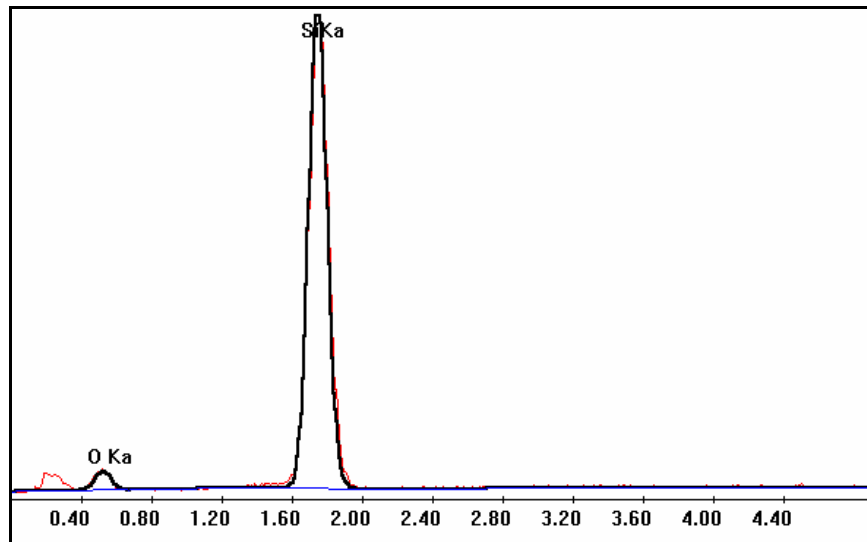


Figura 20. Espectro da inclusão mostrada na figura 19.

Na figura 21 é mostrado um grão de ilmenita com várias inclusões de quartzo, cujos resultados com o EDS mostraram somente espectros com picos de silício e oxigênio. Nesta foto foi destacada apenas uma inclusão, com aproximadamente 40 μm . A figura 22 mostra o espectro da inclusão de quartzo indicada pela seta na figura 21.



Figura 21. Imagem do MEV de várias inclusões de quartzo em um grão de ilmenita.

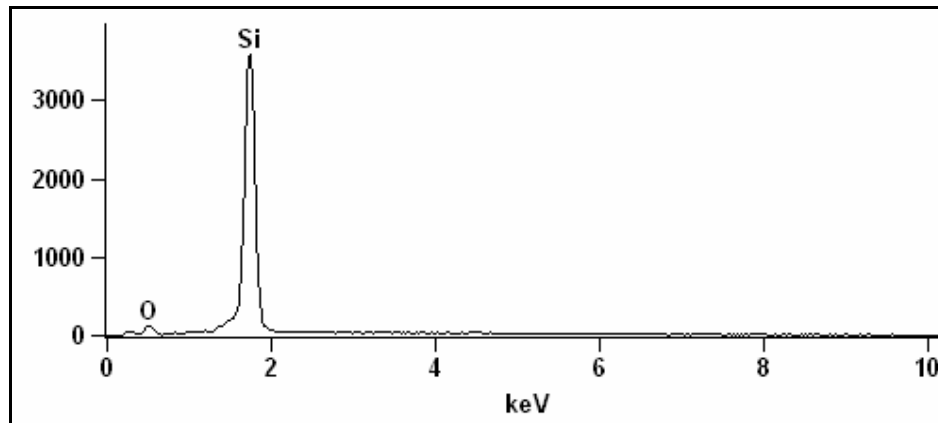


Figura 22. Espectro da inclusão mostrada na figura 21.

É importante salientar que se fossem encontradas inclusões minerais na grande maioria dos grãos de ilmenita, como aquelas mostradas nas figura 19 e 21 e, cuja análise com EDS identificasse a presença de algum elemento radioativo, principalmente o tório (característico da monazita), poderia se afirmar que estas inclusões interfeririam no resultado do teor final do concentrado de ilmenita.

Assim, a presença da monazita no concentrado final de ilmenita deve-se ao fato de se encontrar liberada na jazida, se incorporando ao concentrado final na planta VSI, durante os processos de separação magnética e eletrostática, os quais não apresentam alta eficiência.

No anexo I são mostradas algumas imagens adicionais de inclusões em alguns grãos de ilmenita observadas no microscópio eletrônico, juntamente com as análises do EDS.

5 CONCLUSÕES

O resultado da análise granulométrica do concentrado final de ilmenita mostra que os grãos deste mineral concentram-se nas frações $-0,177$ e $+0,125$ mm, constituindo 50% da amostra.

A análise do concentrado de ilmenita, através da visualização em lupa, mostrou uma composição mineralógica bem variada, apresentando como mineral principal a ilmenita, que representa cerca de 98% da amostra. Nesta massa, aproximadamente 3,4% representam a fração de leucoxeno no concentrado final, indicando que existe uma considerável alteração da ilmenita.

A grande quantidade de leucoxeno no concentrado final da ilmenita mostra que, mesmo alterado, o leucoxeno não perde suas propriedades eletromagnéticas, seguindo desta maneira no processo de concentração da ilmenita, não podendo desta forma ser retirado do processo.

A observação através da lupa possibilitou, também, a identificação de grãos de monazita no concentrado final da ilmenita, mesmo que em quantidades muito pequenas. A presença destes grãos indica que a monazita encontra-se liberada e, devido a sua propriedade magnética, segue para a etapa final de concentração da ilmenita. Ainda, a monazita apresenta grãos minerais menores que os grãos de ilmenita, os quais, provavelmente, por esta razão, poderiam ter sido arrastados no processo de concentração.

Em pequenas frações aparecem também os minerais estaurolita, turmalina, zircão, rutilo, cianita e outros minerais não identificados. Por serem frações muito pequenas, a presença destes minerais não interfere na qualidade do concentrado. Provavelmente seguem na rota do processo de concentração da ilmenita, durante a etapa dos separadores magnéticos e eletrostáticos, já que a eficiência do processo não é 100%.

Foi importante fazer a identificação da natureza das inclusões minerais nos grãos de ilmenita para analisar a presença da monazita ou outro mineral radioativo, já que existe zircão na jazida e este mineral pode também conter elementos radioativos.

Nenhuma das amostras visualizadas no MEV apresentou inclusões de monazita, embora algumas evidências mostradas por vazios deixados por algumas inclusões, indiquem provável presença de monazita, já que os mesmos poderiam ter sido arrancados durante a etapa de lixamento e polimento das amostras. Mas mesmo que fossem identificados através da análise com EDS, seriam quantidades insignificantes, ou melhor, não seriam representativos, o que provavelmente não interferiria no resultado do teor do concentrado final de ilmenita.

Foram identificados também em alguns grãos de ilmenita, outros vazios deixados por inclusões, cujas análises com EDS mostraram picos de silício, alumínio, cálcio e fósforo. Provavelmente traços destes minerais permaneceram nos vazios. Assim, tendo em vista a quantidade destes vazios, é também provável que não interfeririam no resultado do teor do concentrado final de ilmenita.

Muitas inclusões de quartzo foram identificadas nos grãos de ilmenita, cujas presenças não interferem, também, na qualidade do concentrado da ilmenita.

A monazita, como contaminante, encontra-se na forma de grãos liberados. Apesar de evidências de sua presença como inclusões nos grãos de ilmenita do concentrado final, não interfere, desta maneira, no resultado do teor final do concentrado de ilmenita.

Já que o processo de separação para concentrar a ilmenita não tem eficiência de 100%, acaba gerando estes contaminantes. Como o controle da monazita é bastante rígido, devido ao seu comportamento radioativo, é necessária sua eliminação quase que total do processo. Para isto seria necessário melhorar a eficiência dos separadores magnéticos e eletrostáticos usados para a concentração da ilmenita, sem afetar, com isto, sua recuperação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEST, S. **Investor Briefing**. Consolidated Rutile Limited – CRL; Queensland, Austrália, 2006. Disponível em: <http://www.consrutile.com.au/uploads/571430_Investor_briefing_March_2006.pdf> Acesso em: 14 jun. 2006.

CAÚLA, J.A.L.; DANTAS, J.R.A. **Depósito de Titânio/Zircônio de Mataraca, Paraíba**. Principais depósitos minerais do Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral Brasília, 1997, v.4, cap. 53, p. 593-598.

CHERNET, T. Applied mineralogical studies on australian sand ilmenite concentrate with special reference to its behaviour in the sulphate process. **Mineral Engineering**; v.12, n.5; p. 485-495, 1999.

DANA, J.D. **Manual de mineralogia**. 1ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1969. 669p.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas – uma introdução**. 1ed. London: Longmans, Green and Co., Ltd., 1966. 558 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&ID Pagina=294>> Acesso em: 16 jun. 2006.

GAMBOGI, J. **Titanium Mineral Concentrates**. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2006. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/timinmcs06.pdf>> Acesso em: 14 jun. 2006.

GREELEY, M.N. **Titanium**. Circular 9. Department of Mines and Minerals Resources. Arizona, 1982. Disponível em: <<http://mines.az.gov/Publications/circ009titanium.html>> Acesso em: 14 jun. 2006.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Minerais: Ilmenita, Rutilo e Zirconita.** Indústrias Nucleares do Brasil S.A., 2005. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/minerais.asp>> Acesso em: 22 ago. 2005.

LENER, E.F. **Mineral chemistry of heavy minerals in the old hickory deposit, sussex and dinwiddie counties, Virginia.** Thesis - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg, Virginia, 1997. 93 p

MAIA, A. **Titânio.** Balanço Mineral Brasileiro. DNPM, 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/titanio.pdf>> Acesso em: 28 jun. 2006.

MAIA, A. **Titânio.** Sumário Mineral Brasileiro. DNPM, 2005. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumariomineral2005/TITÂNIO%202005rev.doc>> Acesso em: 16 jun. 2006.

MINERALS ZONE. **Ilmenite.** World Mineral Exchange. Disponível em: <<http://www.mineralszone.com/minerals/ilmenite.html>> Acesso em: 12 mai. 2006.

NEXANT. **Titanium Dioxide.** Nexant ChemSystems Reports. Disponível em: <http://nexant.ecnext.com/coms2/gi_0255-179/Titanium-Dioxide.html> Acesso em: 29 jun. 2006.

PINCOCK; ALLEN; HOLT. **Mineral Sand Deposits.** Issue no. 66. Maio, 2005. Disponível em: <<http://www.pincock.com/perspectives/Issue66-Mineral-Sands.pdf>> Acesso em: 14 jun. 2006.

PUBLIC AFFAIRS BRANCH. **Mineral Sands.** Fact Sheet 10: Department of Minerals and Energy, Western Australia, 1996. Disponível em: <http://www.doir.wa.gov.au/documents/gswa/GSD_Fact_Sheet_10.CV.pdf> Acesso em: 12 mai. 2006.

RÉ, E.R.; MARQUES, M.B. **Planejamento de lavra para mineração de minerais pesados para titânio.** X Workshop Datamine. 2002, 13p. Disponível em: <<http://www.datamine.com.br/arquivos/RicardoRe.pdf>> Acesso em: 2 jun. 2006.

SABEDOT, S. **Caracterização tecnológica e beneficiamento mineral para a produção de concentrado de zircão de alta qualidade, partindo de pré-concentrado e concentrado de zircão de baixa qualidade, produzidos na Mina do Guaju (PB)**. Porto Alegre, 2004. 94 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS.

SABEDOT, S.; SAMPAIO, C.H. Caracterização de zircões da Mina Guaju (PB). **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.55, n.1., p. 49-53, 2002.

SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L. M.M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 603 p.

SILVA, C.G. Placeres Marinhos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.18, n.3, p. 327-336. São Paulo, 2000.

TOLEDO, M.C.M.de; OLIVEIRA, S.M.B.de; FONTAN, F.; FERRARI, V.C.; PARSEVAL, P.de. Mineralogia, morfologia e cristalquímica da monazita de Catalão I. **Revista Brasileira de Geociências**, v.34; p. 135-146, 2004.

TYLER, S.A; MARSDEN, R.W. The Nature of Leucoxene. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.8, n.2, p. 55-58, Pl. 1, 1938.

ANEXO I

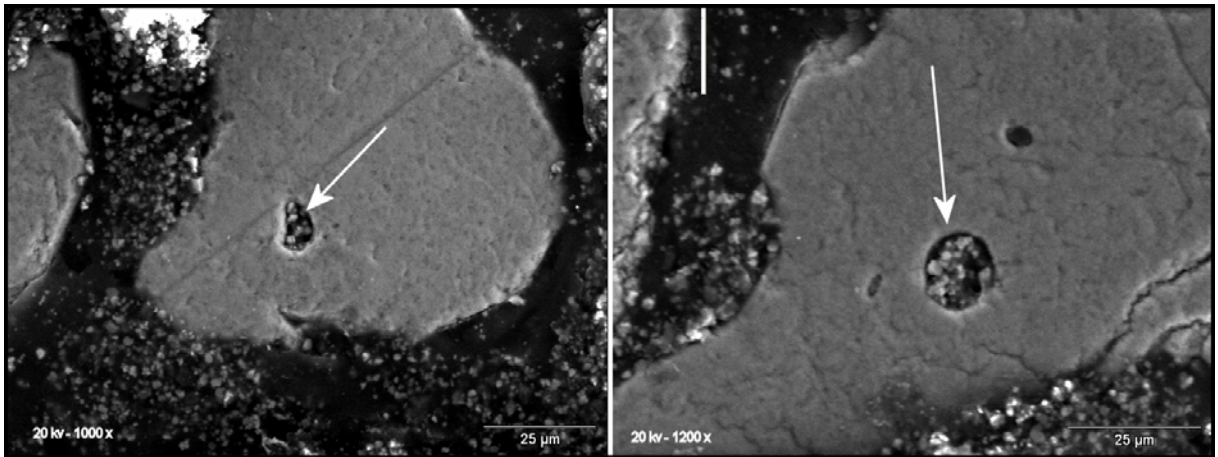


Figura 23. Imagens do MEV de inclusões minerais contendo alumínio em alguns grãos de ilmenita.

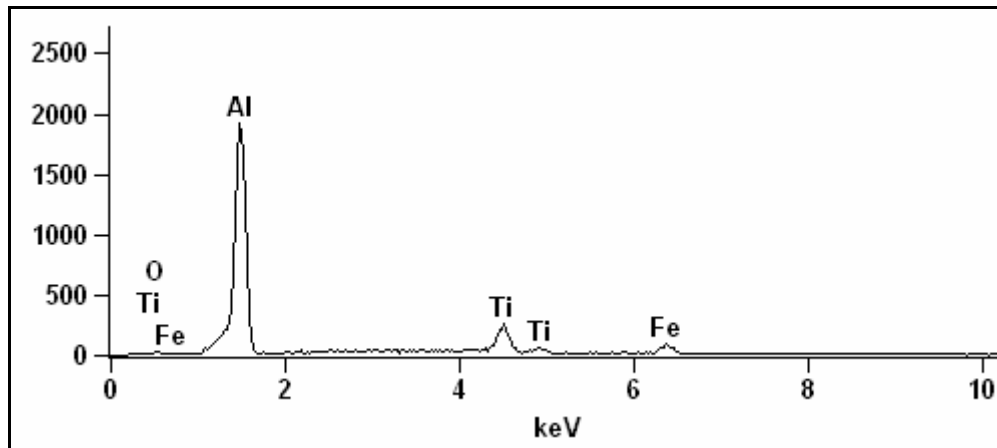


Figura 24. Espectro das inclusões minerais mostradas na figura 23.

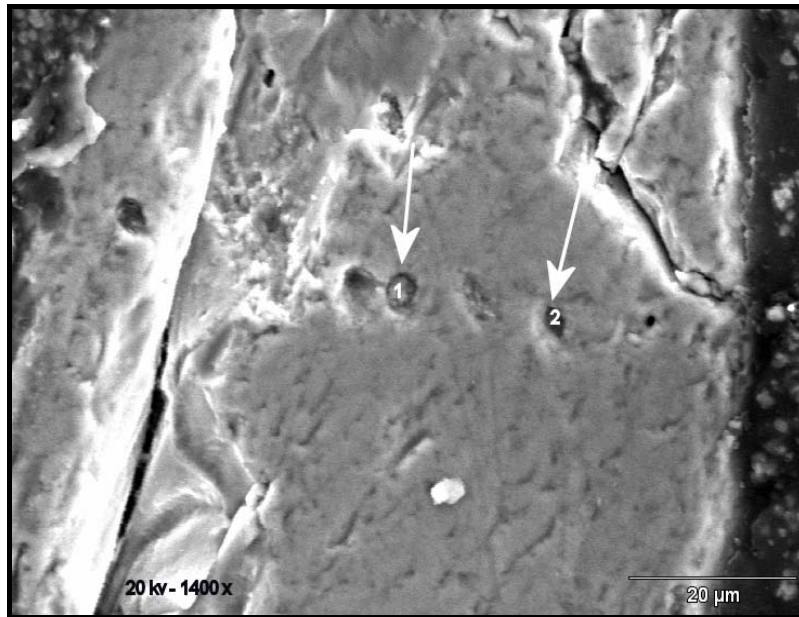


Figura 25. Imagem do MEV de pequenas vazios deixados por inclusões (1 e 2) em um grão de ilmenita.

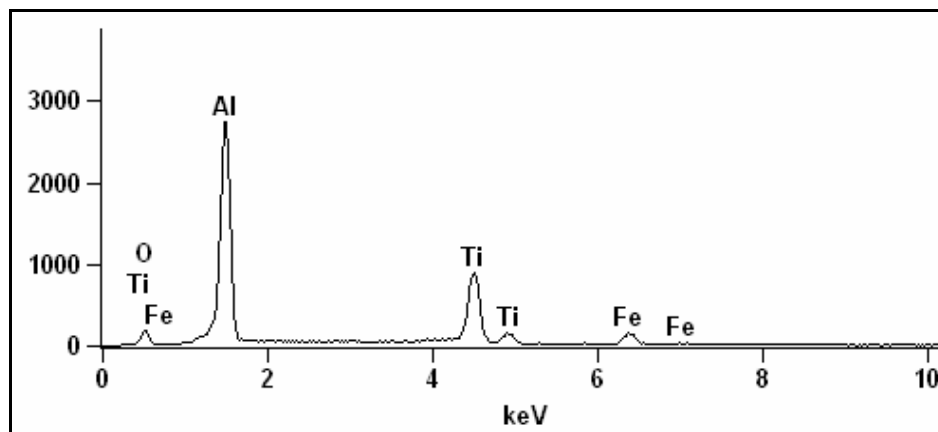


Figura 26. Espectro do vazio número 1, deixado por uma inclusão mineral mostrado na figura 25.

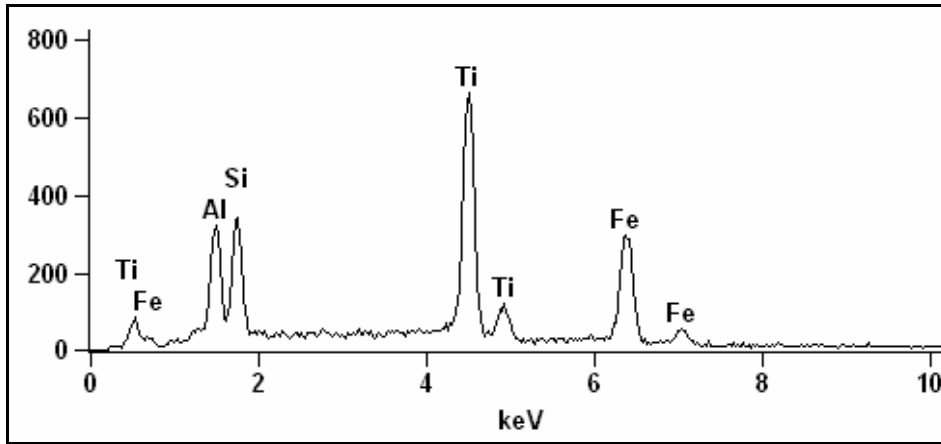


Figura 27 Espectro do vazio número 2, deixado por uma inclusão mineral mostrado na figura 25.

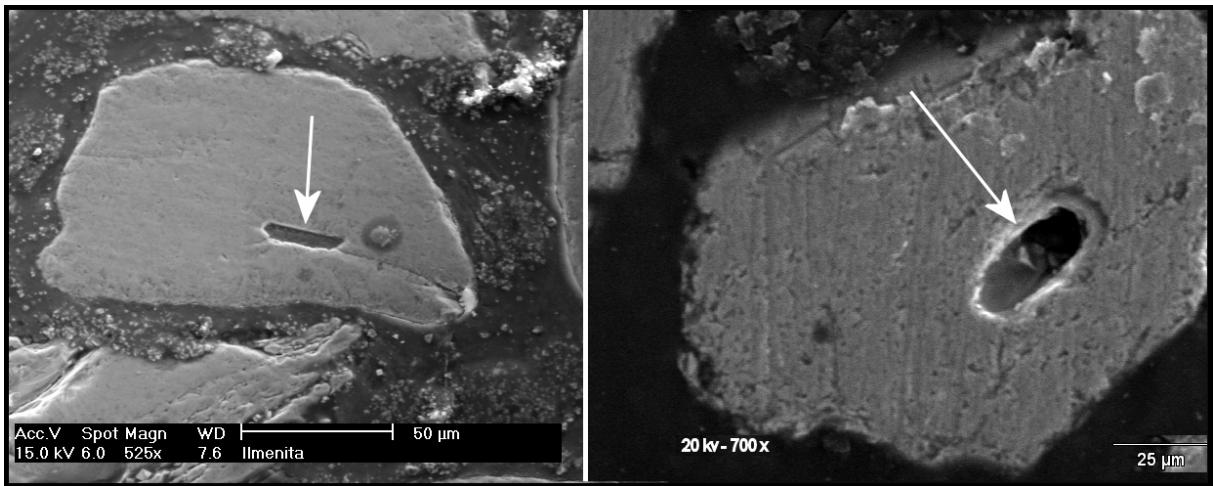


Figura 28. Imagem do MEV de vazios deixados por inclusões minerais em alguns grãos de ilmenita.

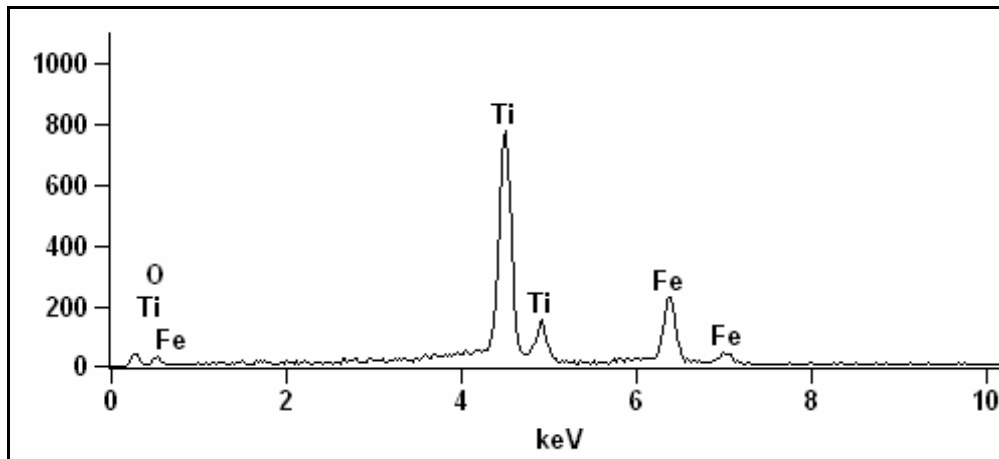


Figura 29. Espectro dos vazios deixados por inclusões minerais mostradas na figura 28.

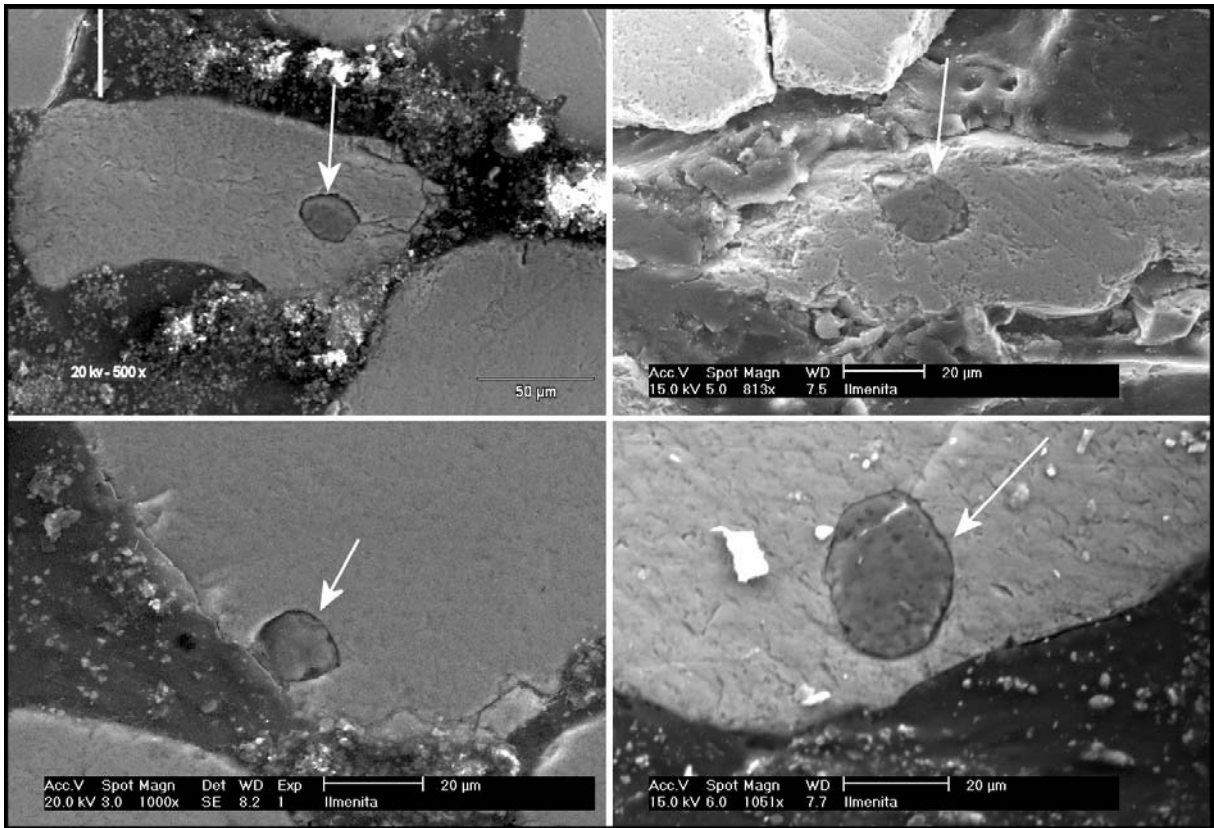


Figura 30. Imagens do MEV de inclusões de quartzo em alguns grãos de ilmenita.

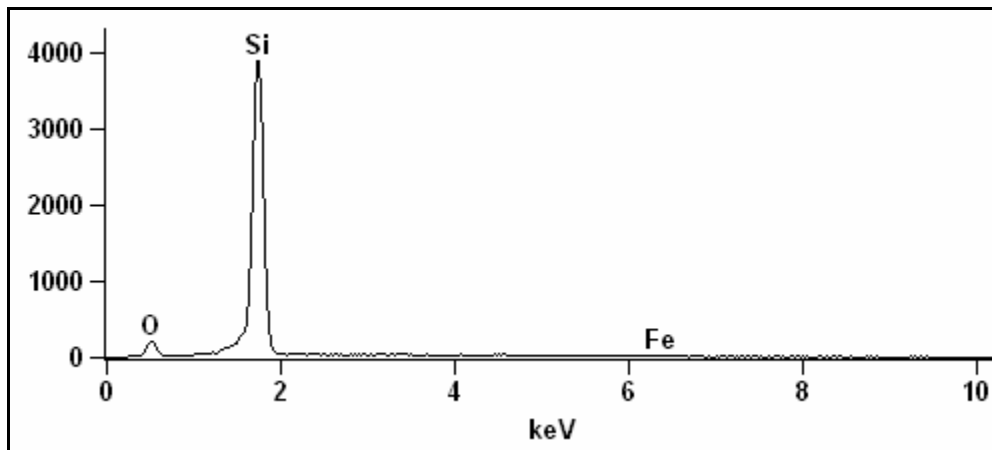


Figura 31. Espectro das inclusões de quartzo mostradas na figura 30.