

3

Revisão Bibliográfica

3.1.

Titânio

O titânio (Ti) é um metal de transição cujo número atômico é 22 e a massa 47,90 u, de cor branca metálica. É considerado o quarto metal estrutural mais abundante na superfície terrestre e o nono na gama de metais industriais, é um elemento litófilo e tem uma forte afinidade por oxigênio. É encontrado naturalmente na forma de óxidos, em escórias de certos minerais de ferro e nas cinzas de animais e plantas (CHRISTIE e BRATHWAITE, 1998). Este elemento metálico é conhecido por sua excelente resistência mecânica e à corrosão (quase tão resistente quanto à platina). Possui baixa condutividade térmica e elétrica. É um metal leve, forte e de fácil fabricação com baixa densidade (40% da densidade do aço). Quando puro é bem dúctil e fácil de trabalhar. O ponto de fusão relativamente alto faz com que seja útil como um metal refratário. Ele é tão forte quanto o aço, mas 45% mais denso. É 60% mais denso que o alumínio, porém duas vezes mais forte. Tais características fazem com que o titânio seja muito resistente à fadiga. Esse metal forma uma camada passiva de óxido quando exposto ao ar, mas quando está em um ambiente livre de oxigênio ele é dúctil. Queima quando aquecido e quando imerso em nitrogênio gasoso. É resistente à dissolução nos ácidos sulfúrico, clorídrico, e na maioria dos ácidos orgânicos (CHRISTIE e BRATHWAITE, 1998). Quanto à fabricação do titânio metálico, existem atualmente seis tipos de processos disponíveis: Kroll, Hunter, redução eletrolítica, redução gasosa, redução com plasma e redução metalotérmica. Dentre estes, destaca-se o processo Kroll, como principal responsável, pela maioria do titânio metálico produzido no mundo ocidental.

3.1.1.

Geologia dos Depósitos de Titânio

A geologia dos depósitos minerais de titânio foi revista por FORCE (1991), e sua distribuição mundial foi resumida por TOWNER *et al.* (1988). Mais da metade da produção mundial de titânio é proveniente de ilmenita e rutilo, é

encontrado nos litorais em depósitos de placeres como na Austrália, África do Sul, EUA, Índia e Sri Lanka. O restante é fornecido principalmente por depósitos magmáticos de ilmenita, como por exemplo, no Canadá, Noruega, Finlândia e EUA. O titânio está presente em inúmeras rochas (Tabela 2). A divisão de titânio entre óxidos e as fases de silicatos varia grandemente entre os diferentes tipos de rochas (Tabela 3). Minerais de titânio são extraídos de rochas cristalinas duras, rochas intemperizadas, e sedimentos não consolidados. A Tabela 4 mostra uma grande diversidade de tipos de depósitos e a relação entre eles.

Tabela 2 – Conteúdos típicos e proporções de titânio em algumas rochas comuns.

Tipo de rocha	TiO ₂ (%)	TiO ₂ em óxidos (Como % total de TiO ₂)
Rochas Ígneas		
Ultramáficas	0,2 – 0,8	1 – 4
Máficas	0,9 – 2,7	50
Félsicas	0,2 – 0,8	3 – 30
Alcalinas	0,1 – 3,3	3 – 50
Charnoquíticas	0,4 – 1,6	50 – 95
Anortosíticas	0,1 – 0,5	50 – 95
Rochas Metamórficas		
Gnaiss	0,6	5 – 100
Filitos e Xistos	0,6	1 – 70
Anfibolito	1,4	15 – 70
Serpentinó	0,0	--
Eclogito	1,0 – 6,0	50 – 90
Rochas Sedimentares		
Arenito	0,2 – 0,6	10 – 100
Xisto	0,6 – 0,7	--
Calcário	0,1 – 0,2	--

Fonte: Geological Society of America. Force, E. R.

3.1.1.1. Depósitos Mágmatícos ou Ígneos

A classe mais importante de depósitos magmáticos de ilmenita é associada com complexos de anortosito ou gabro-anortosito, principalmente do Pré-cambriano. Os minérios ocorrem normalmente em lentes ricas em ilmenita, diques e anortositos de soleiras de corte, e em menor importância, disseminados nos anortositos. A ilmenita provavelmente cristalizada a partir de um imiscível rico em ferro-titânio, em fase líquida de um pesado magma ferrodiorito (FORCE, 1991), que formaram camadas singenéticas e segregações, bem como

autoincrustações em parte, ou totalmente solidificado em gabro-anortositos. Os minerais incluem magnetita, ilmenita titanífera (com titânio-hematita exsolvida e ulvospinela), plagioclásio, piroxênio, olivina, granada, biotita, apatita, rutilo e pirrotita.

Uma segunda classe de depósitos magmáticos, perovskita, rutilo, brookita e/ou ilmenita ocorrem em complexos alcalinos predominantemente compostos de nefelina sienitos, mas são particularmente associadas com fases de piroxenitos. Os minerais de titânio na maior parte ocorrem em diques de magnetita-perovskita introduzindo piroxenitos. Exemplos incluem a Faixa de *Ilmen* do *Ural Mountains* (localidade tipo de ilmenita), *Powderhorn* em Colorado (perovskita), Tapira e Salitre, em Minas Gerais, e Catalão I, em Goiás, Brasil (anatásio).

3.1.1.2.

Depósitos Litorais de Placeres

As concentrações de minerais pesados desenvolvidas em praias costeiras e nas areias das dunas fornecem a maioria da ilmenita, leucoxênio e rutilo, usados pela indústria. Estes depósitos de placeres têm se formado em ambientes de praias modernas ou são depósitos de praias levantadas, formadas durante o Pleistoceno. Os principais países produtores são Austrália, África do Sul, EUA, Índia, Sri Lanka, Malásia e da Tailândia. Novos depósitos estão sendo desenvolvidos no Vietnã e Moçambique (GAMBOGI, 1997).

3.1.1.3.

Depósitos Aluviais de Placeres

Grandes quantidades de rutilo têm sido extraídas de depósitos aluviais Quaternários no distrito Gbangbama da Serra Leoa, onde os depósitos são na sua maioria cerca de 10 m e até 20 m de espessura, e ficam diretamente sobre a rocha. São radiais aos montes Gbangbama, que são compostas por anfibolitos granulitos, este último contendo 0,2% a mais do que 1% de rutilo. Os teores totais de minerais pesados no material aluvial geralmente variam de 1% a 5%, com índices de rutilo que variam de 0,5% - 2%. Uma fonte rica em rutilo e intemperismo foram os principais fatores no desenvolvimento do depósito. Óxidos de titânio têm sido produzidos como subproduto da mineração de cassiterita aluvionar, na Malásia, Indonésia e Tailândia.

Tabela 3 – Composição de alguns minerais de titânio comuns.

Mineral	Formula teórica	TiO ₂ conteúdo (%)
Óxidos		
Rutilo	TiO ₂	>95
Anatásio	TiO ₂	>95
Brookita ⁽¹⁾	TiO ₂	>95
Ilmenita	FeTiO ₃	52 ⁽²⁾
Perovskita ⁽¹⁾	CaTiO ₃	59 ⁽²⁾
Magnetita	Fe ₃ O ₄	0 – 15
Silicatos		
Titanita	CaTiSiO ₅	41 ⁽²⁾
Andradita ⁽¹⁾	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂	0 – 17
Biotita	K ₂ (MgFe) ₄ (FeAl) ₂ Si ₆ Al ₂ O ₂₀ (OHF) ₄	0 – 6
Anfibólios Cálcicos	(NaK)Ca ₂ (MgFeAl) ₅ Si ₆ Al ₂ O ₂₂ (OHF) ₂	0 – 10
Augita	Ca(MgFe)(SiAl) ₂ O ₆	0 – 9

Fonte: Geological Society of America. Force, E. R

Nota: (1) Fases restritas aos tipos de rochas incomuns; (2) valor estequiométrico.

Tabela 4 – Tipos de depósitos de minerais de titânio e seus minerais.

Classe	Tipo	Mineralogia típica	Exemplo
Metamórficas	Eclogito	Rutilo	Piampaludo, Itália
	Aluminossilicato	Rutilo	Evergreen, Colorado
	Contato ultramáfico	Rutilo	Dinning, Maryland
Ígneos	Ilmenita magmática	Ilmenita	Allard Lake, Canadá Roseland, Virginia
	Anortosito excedente	Rutilo, ilmenita	Roseland, Virginia
	Albitita (Kragerita)	Rutilo	Kragero, Noruega
	Alcalina	Perovskita Nb-rutilo Nb-brookita	Powderhorn, Colorado; Magnet Cove, Arkansas
Hidrotermais		Pórfiro Rutilo	Birgham, Utah
Sedimentares	Fluvial	Ilmenita, rutilo	Gbangbama, Serra Leona
	Glaciolacustrino	Ilmenita, rutilo	Port Leyden, New York
	Litoral (eólicos e costeiros)	Ilmenita, Ilmenita alterada, rutilo	Richards Bay, África do Sul. Stradbroke Island, Austrália
Intemperizados	Rocha matriz alcalina	Anatásio	Tapira, Brasil
	Rocha matriz máfica	Ilmenita	Roseland, Virginia
	Rocha matriz aluvial	Ilmenita alterada, leucoxênio	Trail Ridge, Florida

Fonte: Geological Society of America. Force, E. R

3.1.2.

Reservas e Concentrados de Titânio

O Brasil, figura como detentor da quinta maior reserva mundial de ilmenita (Tabela 5). Outros importantes depósitos de ilmenita ainda não devidamente avaliados ocorrem ao longo da costa brasileira, na forma de depósitos de placeres de praia ou em terraços marinhos, no litoral do nordeste, sudeste e sul do país (MME, 2010).

O país também é o detentor das maiores jazidas de titânio na forma de anatásio conhecidas no mundo, avaliadas em 440 milhões de toneladas, com teores médios de 17,7% TiO_2 , que ocorrem nos estados de Minas Gerais e Goiás. A notável tonelagem desse tipo de minério de titânio deve ser registrada como um recurso explorável no futuro, tendo em vista que até o presente, apesar dos investimentos realizados pela Vale, não há comprovação de processos metalúrgicos técnica e economicamente viáveis que permitam a instalação de unidades industriais de processamento para o aproveitamento desse bem mineral. Também são conhecidas reservas de anatásio no Pará. Embora não exista produção comercializada, o minério de titânio que é lavrado como capeamento do minério de fosfato, é estocado em algumas minas de Goiás e Minas Gerais (MME, 2010).

A produção mundial dos concentrados de titânio diminuiu aproximadamente 10% entre 2008 e 2009 (Tabela 5). A diminuição foi estimulada pela crise mundial. O Brasil possui 6% das reservas mundiais de titânio e produziu, no ano de 2009 aproximadamente 0,90% da produção mundial. Os maiores produtores mundiais de titânio são: Austrália (26%), África do Sul (19%) e Canadá (10%). A China, que detém as maiores reservas mundiais de titânio (25%), produziu aproximadamente 10% do total mundial em 2009 (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2010).

A produção brasileira de titânio concentrado aumentou gradativamente a uma taxa de aproximadamente 8% ao ano entre os anos de 2000 e 2008. Neste período a produção brasileira elevou-se mais de 100%. No ano de 2008, a Millennium Inorganic Chemicals Mineração Ltda., localizada no município de Mataraca (PB) foi responsável por produzir aproximadamente 80% do beneficiamento nacional do titânio contido, ressalta-se que a Millennium Inorganic Chemicals Mineração Ltda. é a única produtora de dióxido de titânio da América do Sul. (DNPM, 2009).

Tabela 5 – Reserva e produção mundial de minerais de titânio.

Ilmenita	Produção Mineira		Reservas ⁽⁶⁾
	2008	2009^(e)	
Estados Unidos ⁽²⁾	⁽⁷⁾ 200	⁽⁷⁾ 200	6.000
Austrália	1.320	1.210	130.000
Brasil	54	50	43.000
Canadá ⁽⁸⁾	850	600	31.000
China	600	600	200.000
Índia	432	380	85.000
Madagascar	–	60	40.000
Moçambique	197	200	16.000
Noruega ⁽⁸⁾	410	370	37.000
África do Sul ⁽⁸⁾	1.050	1.000	63.000
Ucrânia	300	270	5.900
Vietnã	330	200	1.600
Outros países	55	50	26.000
Total	5.800	5.190	680.000

Rutilo			
Estados Unidos	⁽⁹⁾	⁽⁹⁾	400
Austrália	309	293	22.000
Brasil	2	2	1.200
Índia	20	18	7.400
Moçambique	6	6	480
Serra Leoa	75	60	2.800
África do Sul	121	100	8.300
Ucrânia	57	50	2.500
Outros países	–	–	400
Total (rutilo ⁽²⁾)	⁽⁹⁾590	⁽⁹⁾529	45.000
Total (rutilo e ilmenita ⁽²⁾)	6.390	5.720	730.000

Fonte: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2010.

Nota: (e) Dados estimados; Não disponível. – Zero; (2) arredondadas com aproximação 0,1 milhão de toneladas; (6) Ver Anexo C para as definições; (7) Inclui rutilo; (8) Produção minerária, é usada principalmente para produzir escória titanífera; (9) Produção E.U. rutilo está incluído na ilmenita.

Os minerais que apresentam interesse econômico segundo (DANA e FORD, 1932; DANA e HURLBUT, 1960) são: ilmenita, leucoxênio, rutilo, anatásio, brookita, perovskita, titanita e geikielita.

A **ilmenita** (FeTiO_3) é um mineral de titânio abundante de ocorrência comum. Apresenta-se na cor preta decorrente da presença de ferro, cristaliza no

sistema hexagonal, romboédrico. Teoricamente possui 53% de TiO_2 e 47% de FeO ; pode conter pequenas quantidades de magnésio e manganês e, em muitos casos, até 6% em peso de Fe_2O_3 . É um mineral opaco, brilho submetálico, dureza entre 5,0 e 6,0 na escala de Mohs; possui massa específica entre 4,10 e 4,80 g/cm^3 , pode ser magnética sem aquecimento.

O **leucoxênio** é geralmente reconhecido como 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 . Ocorre com titanita, ilmenita, perovskita ou outros minerais de titânio.

O **rutilo** (TiO_2) é um mineral escasso, apresenta-se nas cores vermelha e castanho avermelhado a preta, cristaliza-se no sistema tetragonal, tem brilho adamantino a submetálico, dureza 6,0 a 6,5 na escala de Mohs; massa específica 4,18 g/cm^3 a 4,25 g/cm^3 . É um mineral subtranslúcido, podendo ser transparente, composto quase que essencialmente de TiO_2 , podendo conter até 10% de impurezas.

O **anatásio** (TiO_2) era um mineral conhecido, até pouco tempo, apenas no meio acadêmico. Essa situação mudou com a descoberta de importantes ocorrências no Brasil. O anatásio, também conhecido como octaedrita, é um produto de alteração do rutilo e da brookita. Cristaliza-se no sistema tetragonal, apresenta-se na coloração castanha no estado natural, contém de 98,4% a 99,8% de TiO_2 . A massa específica do anatásio é de 3,9 g/cm^3 , sua dureza varia de 5,5 a 6,0 na escala de Mohs; tem brilho adamantino.

A **brookita** (TiO_2) é um mineral constituído de óxido de titânio, sendo idêntico ao rutilo e anatásio em termos de sua composição química, porém cristaliza no sistema ortorrômbico.

A **perovskita** (CaTiO_3) é um mineral isométrico, encontrado usualmente nas rochas metamórficas. Apresenta-se nas cores; preta, vermelha ou amarela, contém de 38% a 58% de TiO_2 , massa específica 4,01 g/cm^3 , cristaliza-se no sistema ortorrômbico ou monoclinico, mas pode ocorrer no sistema pseudo-isométrico.

A **titanita** (CaTiSiO_5), *titanite*, esfeno ou esfena é um mineral nesossilicato de titânio e cálcio. Traços de impurezas de ferro e alumínio estão invariavelmente presentes. Também é comum apresentar metais do grupo das terras raras incluindo cério e ítrio.

3.1.3. Dióxido de Titânio (TiO_2)

Em torno de 95% dos concentrados provenientes dos minerais de titânio é destinado à produção de pigmentos de titânio, titânio branco. O restante é empregado na fabricação de esponja de titânio, carbetos, vidros e cerâmicas especiais.

No Brasil, o maior consumo de titânio é destinado à fabricação de tintas, esmaltes e vernizes (52%); seguido pela siderurgia (36%), produção de ferro-ligas (11%) e outras destinações como soldas, anodos para galvanoplastia, e indústria de pisos e revestimentos que absorve aproximadamente 1% desse metal. A indústria nacional de eletrodos é responsável por mais de 95% do consumo nacional de rutilo. O consumo brasileiro de ferro-ligas de titânio, embora pequeno, passou a ser atendido pela importação. O produto é importado pelos setores siderúrgicos e de fundição, cujas ligas compreendem o ferro-titânio e o ferro-silício-titânio (MME, 2010).

A utilização industrial do titânio mais notável é feito na forma de dióxido de titânio- TiO_2 . Os pigmentos de dióxido de titânio têm grande aplicação na produção de tinta verniz (aproximadamente 50% do total) pela atribuição de elevado grau de refração à luz, opacidade e capacidade de ocultação de imperfeições existentes nas superfícies onde são aplicadas, além de sua inércia química e toxicidade nula.

No cenário mundial, o segundo maior campo de aplicação dos pigmentos é na indústria papelreira, particularmente na fabricação de papel fotográfico. Todo o plástico básico produzido requer a adição de pigmento de titânio que também é requerido na produção de borracha para pneus, esmalte para porcelanas, encerados, revestimentos de paredes e fibras de vidro.

No futuro o TiO_2 terá novas aplicações, algumas delas revolucionárias, a exemplo do dióxido de titânio ultrafino, na escala nanométrica, que opera como catalisador da quebra de compostos de NO_x , atualmente um grave problema ambiental. A idéia é utilizar tais pigmentos em revestimentos de obras civis e fachadas de prédios, transformando-os em grandes catalisadores ambientalmente corretos nas megalópoles do planeta. Tais ultrafinos não recebem tratamento superficial, com o objetivo de preservar suas atividades catalíticas de NO_x e já estão sendo testados em algumas cidades do mundo.

Para a fabricação de pigmentos de TiO_2 , existem dois processos comerciais: o processo “sulfato” e o processo “cloreto”. O processo sulfato, mais

antigo, utiliza a ilmenita ou escória titanífera (*slag*) para reação com ácido sulfúrico, sendo removida uma porção do sulfato de ferro formado. O hidróxido de titânio é precipitado por hidrólise, filtrado e calcinado. O processo “cloreto” utiliza o rutilo como matéria-prima principal, podendo também utilizar o rutilo sintético, a escória titanífera e o anatásio. Poucos problemas de poluição ambiental são encontrados na produção de pigmentos a partir do rutilo, ao contrário da ilmenita. O processo por cloretação, utilizando alimentação de rutilo, gera em torno de 0,2 tonelada de rejeito por tonelada de TiO_2 produzido; o processo de sulfatação, usando ilmenita, gera 3,5 toneladas de rejeitos por tonelada do produto.

A planta da Dupont executa apenas operações de tratamento e acabamento do clínquer importado de suas plantas no México e nos Estados Unidos. A produção atual de dióxido de titânio é da ordem de 108.000 toneladas. No momento, o processo mais utilizado é o sulfato, que é altamente poluente. Após imposição governamental, passou-se a associar a ilmenita com *slag*, que contém mais baixo teor de ferro, reduzindo sensivelmente os efluentes poluidores. A produção de pigmentos a partir do rutilo, através do processo por cloretação, causa poucos problemas ambientais. Atualmente, todos os resíduos do processo por sulfatação são aproveitados como sulfato ferroso, o que inibiu a importação do *slag*.

O mercado mundial de dióxido de titânio movimenta 4,7 milhões de toneladas/ano, estando a América do Norte, com 1,2 milhão, Europa, com 1,69 milhão, Ásia, com 1,5 milhão, e América Latina, com 320 mil.

O mercado brasileiro se diferencia de alguns outros mercados na utilização desse produto. Por exemplo, no segmento de papel e celulose essa utilização está em 6% em virtude de serem usadas mais as cargas minerais. Já os EUA apresentam 21% neste segmento.

O Brasil é o único produtor de pigmentos de dióxido de titânio da América Sul. No país, são produtores de dióxido de titânio a Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S.A., que responde por 62% da produção com sua fábrica em Camaçari (BA), e a DUPONT, com 38%, com sua fábrica em Uberaba (MG) (DNPM, 2009).

3.2. Rio Paracatu Mineração (RPM)

A RPM, empresa controlada pelo grupo canadense Kinross Gold Corporation está localizada a menos de 2 km ao norte da cidade de Paracatu, com cerca de 83 mil habitantes, situada na parte noroeste do estado de Minas Gerais, distante cerca de 500 km de Belo Horizonte e 230 km de Brasília.

A mina a céu aberto, Morro do Ouro tem um dos menores teores auríferos do mundo (0,40 gramas de ouro por tonelada de minério). A empresa investe constantemente em tecnologias de extração que viabilizam as operações em Paracatu, assegurando níveis médios de produção anual de 5,5 toneladas de ouro e 2,0 toneladas de prata.

As instalações da Kinross em Paracatu compreendem uma mina a céu aberto, uma usina de beneficiamento e uma área para armazenamento de rejeitos, além da infra-estrutura superficial (Figura 1). Desde o ano 2000, a Kinross tem respondido por parte significativa da produção e das exportações brasileiras do ouro – respectivamente, entre 15% e 20%, em média, dos totais produzidos e exportados (<<http://www.kinross.com.br>> acesso em 01/10/09).

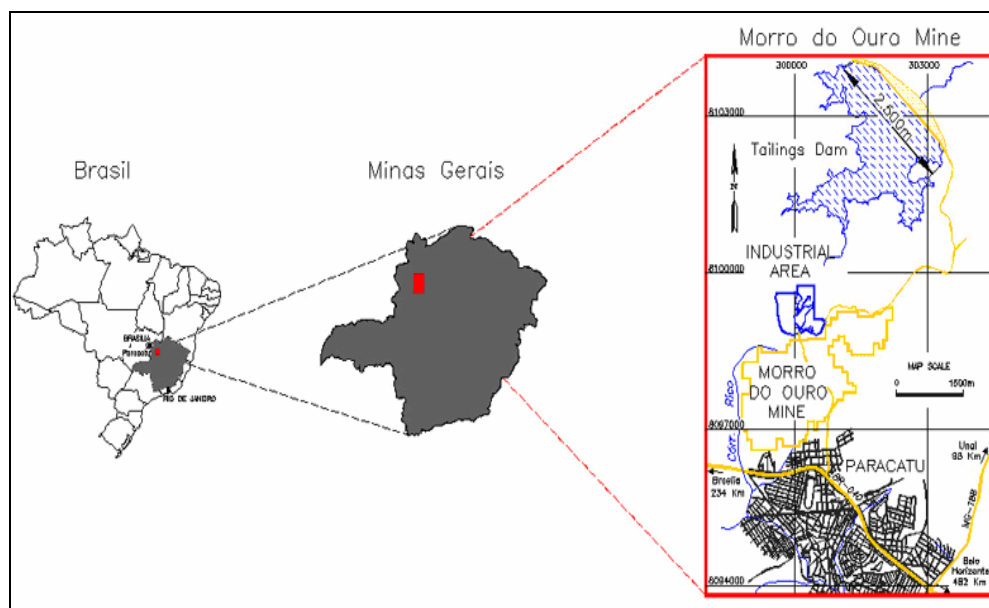


Figura 1 – Mapa de operações da Rio Paracatu Mineração. Fonte: <<http://www.rioparacatumineracao.com.br>> acesso em 01/10/09.

O Brasil responde por mais de 20% da produção mundial de ouro da Kinross, o equivalente a 40 toneladas por ano. Com a expansão da Mina Morro do Ouro, esse percentual tomará proporções ainda mais significativas.

Os investimentos previstos envolvem a ampliação da capacidade de produção da planta atual para 20 milhões de toneladas por ano (Mtpa) de minério de ouro, e a implantação de uma nova planta produtiva, em cava, com capacidade de 41 Mtpa e vida útil até 2036. Depois de concluída a expansão, a mineradora deverá aumentar sua capacidade de lavra de minérios de 17 Mtpa para 61 Mtpa, o que deve resultar em uma produção de cerca de 15 toneladas anuais de ouro, quase o triplo do nível observado nos últimos anos (<<http://www.kinross.com.br>> acesso em 01/10/09).

3.2.1.

Descrição geral das instalações de processo da RPM

A planta de beneficiamento consiste em uma única planta de Britagem, que usa um britador de rolos que alimenta um transportador tipo “sacrifício” seguido por um transportador de longa distância até a pilha de estocagem coberta. Transportadores de Correias conduzem o minério britado para a planta de moagem. Esta consiste de um moinho SAG seguido de moagem secundária que utiliza um único moinho de bolas. Um segundo moinho de bolas será adicionado para moer o minério que tem sua dureza aumentada continuamente. Foi previsto espaço extra para que um britador de pebbles possa ser adicionado para operar em circuito fechado com o moinho SAG no futuro.

Um circuito de separação gravítica foi incluído ao circuito de moagem para recuperar qualquer ouro livre, mais grosso, assim como cristais de arsenopirita que contenham ouro mais grosso. Os testes executados indicaram que os concentradores centrífugos modernos não coletam efetivamente os cristais mais grossos de arsenopirita na alimentação. A planta existente usa com sucesso um jigge YUBA, fabricado localmente, que é baseado no projeto de um jigge Pan-American. O jigge Pan-American, que foi incorporado ao projeto do novo circuito de moagem, é uma versão modificada e melhorada. Nos testes realizados mostrou ser possível alcançar uma produção mais consistente de concentrado. Os jigges foram operados inicialmente com esferas de aço, usadas para criar o leito de meio denso, mas ocorreram problemas de compactação após algumas horas de operação. Descobriu-se que os cristais grossos de arsenopirita no minério eram suficientes para criar um leito nos jigges e o uso das esferas de aço foi interrompido (Figura 2).

A capacidade do circuito de separação gravítica na nova planta é proporcionalmente maior do que a da planta existente. Isto acontece para se tirar vantagem dos dados que mostram os benefícios metalúrgicos de uma produção e uma recuperação em massa mais alta no circuito gravítico.

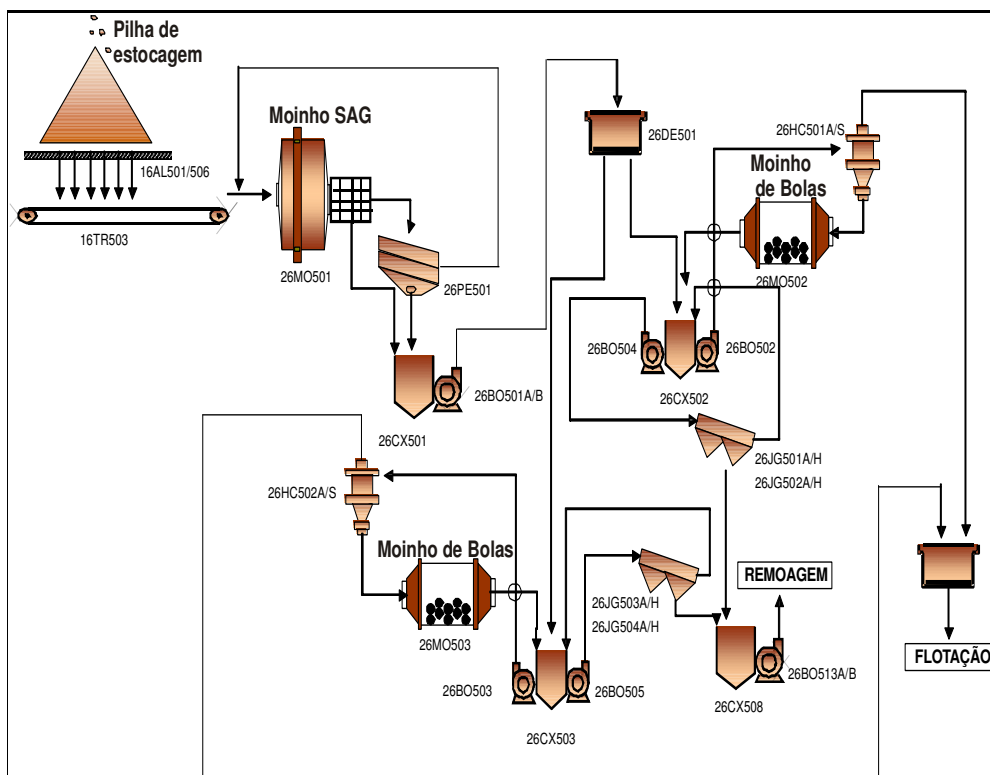


Figura 2 – Fluxograma de Processo – Moagem. Fonte: RPM.

O circuito de flotação consiste de quatro baterias com seis células rougher. O concentrado é limpo em duas baterias com cinco células cleaner. O concentrado da separação gravítica combinado ao concentrado da flotação é espessado antes da remoagem para remover a maior parte dos reagentes e para garantir uma densidade ótima de polpa.

Os concentrados moídos são espessados novamente antes de serem bombeados para a planta hidrometalúrgica. Um concentrador centrífugo opera tanto no underflow do espessador, quanto na carga circulante do moinho de remoagem, para recuperar ouro livre. O concentrado é transportado para uma mesa de concentração gravítica, localizada na refinaria existente (Figura 3).

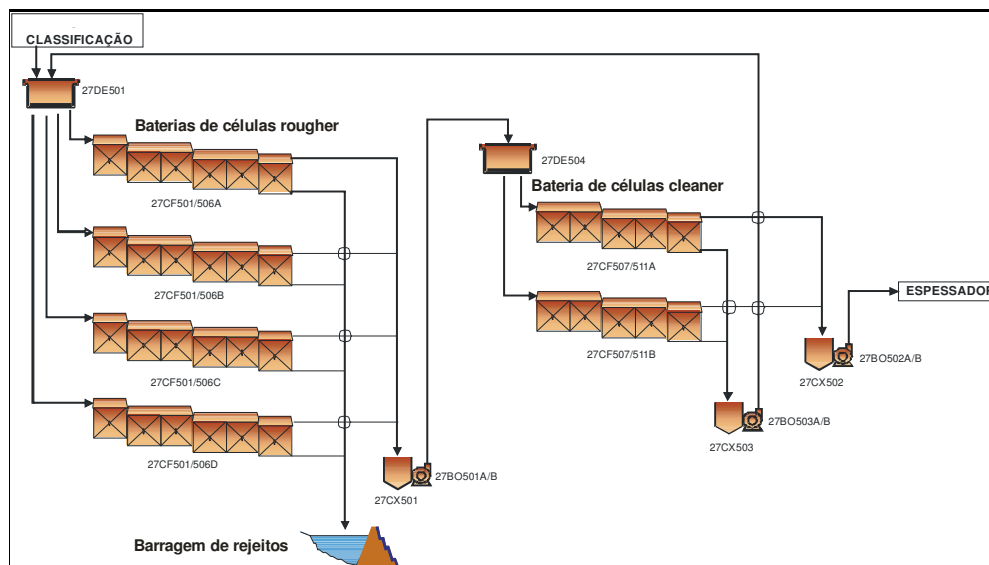


Figura 3 – Fluxograma de Processo – Flotação. Fonte: RPM.

A extração de ouro dos concentrados combinados e remoídos, isto é, dos concentrados gravíticos e de flotação, é executada em um circuito CIL convencional. A planta CIL é precedida por um tanque de pré-aeração que oxida e precipita metais básicos antes da cianetação para reduzir o consumo global de cianeto para valores mais baixos do que aqueles atualmente praticados na planta existente. O ouro é adsorvido pelo carvão em polpa na planta CIL. O carvão ativado é removido pelo peneiramento da polpa e o ouro é removido do carvão ativado por uma coluna de dessorção e por eletrorecuperação. As células de eletrorecuperação estão localizadas no primeiro piso da refinaria existente. A fusão do ouro Doré é executada usando-se os fornos de indução existentes na refinaria atual (Figura 4).

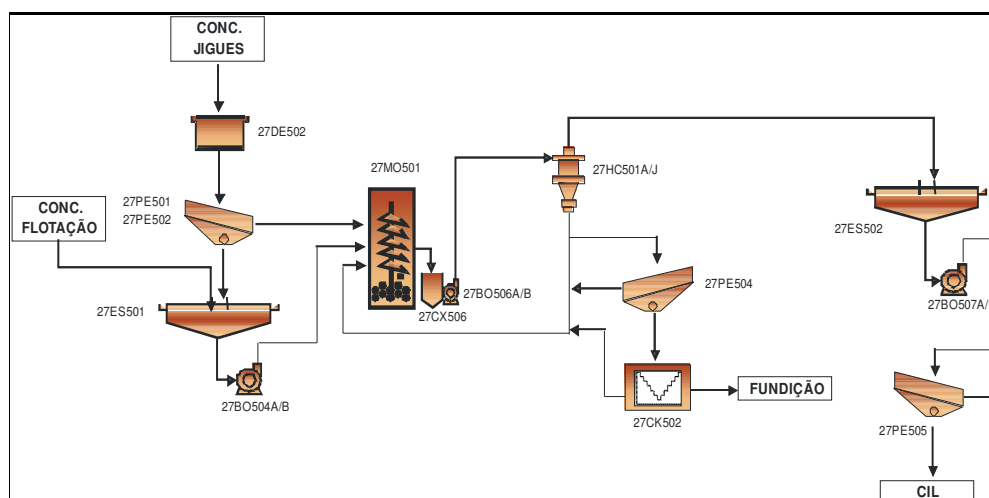


Figura 4 – Fluxograma simplificado – Remoagem e Espessamento. Fonte: RPM

Os rejeitos da flotação são depositados inicialmente na barragem de rejeitos existente a uma taxa de 41 Mt/a, e em 2009 em uma nova barragem de rejeitos que será comissionada para atender a esta quantidade. Os 18 Mt/a da planta existente, que será reiniciada em 2009 serão estocados na barragem de rejeitos atual. Uma planta de Dessulfuração de Rejeitos poderá ser construída em 2016 para reduzir a concentração de sulfeto dos rejeitos antes da deposição. A água é bombeada de ambas as barragens de rejeitos para um tanque de armazenagem adjacente à planta principal de processo. Qualquer excesso de água em qualquer uma das áreas de disposição de rejeitos poderá ser lançado ao meio ambiente embora estas áreas sejam operadas em uma condição de efluente zero.

Os equipamentos de processo foram dispostos de modo a maximizar o fluxo por gravidade, como por exemplo, o fluxo de rejeitos da flotação segue por gravidade para as barragens de rejeito. Os equipamentos de processo foram também dispostos de forma a permitir uma expansão simples ao deixar espaço para moinhos de bolas adicionais e células de flotação *rougher* e *cleaner*.

3.2.2.

Geologia do Depósito de Ouro da RPM

O depósito Morro do Ouro está hospedado nas rochas do Grupo Canastra, porção centro-leste da Faixa Brasília, Província Tocantins (ALMEIDA *et al.*, 1981). A Faixa Brasília, que representa um cinturão dobrado relacionado com o Ciclo Brasileiro (600 Ma) e estende-se por mais de 1000 quilômetros ao longo da margem ocidental do Cráton São Francisco.

A compartimentação tectônica da Faixa Brasília é marcada por dois segmentos de orientação distinta e estilos metamórfico-deformacionais contrastantes: O segmento Setentrional, de orientação NE e o Segmento Meridional de orientação NW. O limite entre estes dois domínios, localizado na altura do paralelo de Brasília (16°S), é marcado pela Sintaxe dos Pireneus (COSTA e ANGEIRAS, 1971), cujos lineamentos têm orientação E-W (Figura 5).

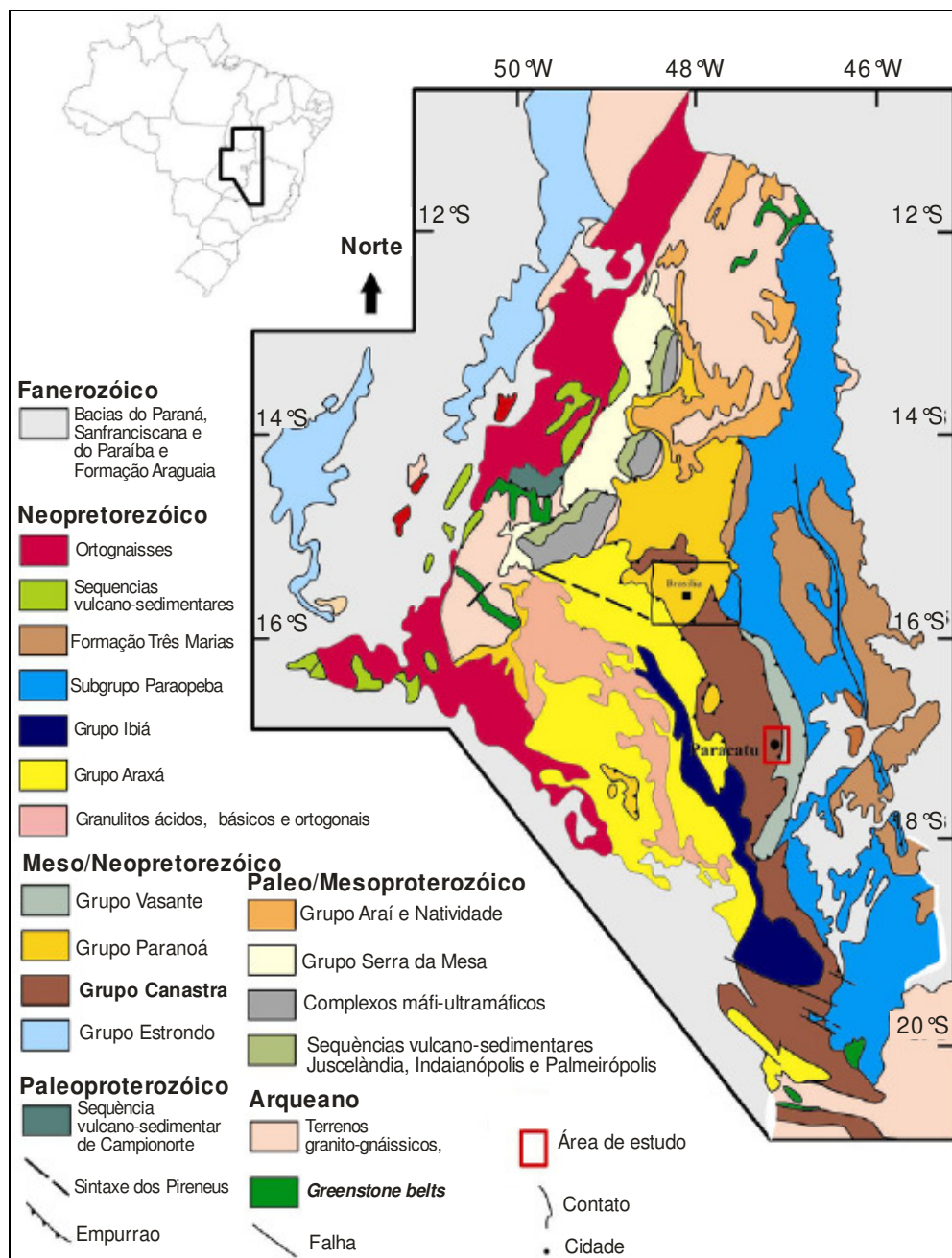


Figura 5 – Mapa geológico e posicionamento estratigráfico das unidades Proterozóicas da Faixa de Dobramentos Brasília. (modificado de FUCK, *et al.* 1994).

A Sequência Morro do Ouro da Formação Paracatu é subdividida em quatro unidades. A Unidade A é constituída por filitos carbonosos com finas intercalações de quartzito. As Unidades B e C são auríferas, constituídas por filitos carbonosos com intercalações de quartzitos e sericita-clorita filitos, apresentando sulfetos e expressiva ocorrência de *boudins* de quartzo. A Unidade

D é composta por filitos carbonosos com intercalações de quartzito, metassilito e clorita filito.

Na região de Paracatu, o Grupo Canastra é representado pela Formação Paracatu, inicialmente definida por ALMEIDA (1969) como camadas de filitos cinza com intercalações quartzosas. A deformação principal da Formação Paracatu é caracterizada por elementos planares (foliação e falhas) de baixo ângulo, dobras de cisalhamento recumbentes a isoclinais assimétricas, milimétricas a centimétricas, dobras intrafoliais e pela transposição generalizada das estruturas sedimentares nas unidades pelíticas (DARDENNE, 2000).

O minério de ouro lavrado pela RPM é um metapelito situado na base da Formação Paracatu, cuja sequência foi informalmente denominada Fácies Morro do Ouro, composta por filitos sericíticos carbonosos, com intercalações de até 8 m de quartzitos e ocorrência de *boudins* de quartzo (Figura 6).

Filitos e xistos carbonosos são os principais litotipos da Formação Paracatu. Apresentam deformação significativa, com formação de sigmóides de quartzo, onde se alojam pequenas concentrações de ouro. Intercalações de quartzito e carbonatos são comuns nesta unidade (FREITAS-SILVA e DARDENNE, 1994).

A mineralização aurífera do Morro do Ouro pode ser atribuída à precipitação de fluídos hidrotermais da própria rocha encaixante, ricos em ouro, sulfetos, carbonatos e sílica. O depósito Morro do Ouro ocorre associado à *boudins* de quartzo, siderita e sulfetos, distribuídos ao longo da camada que foi submetida a uma intensa deformação de baixo ângulo. Os sulfetos ocorrem disseminados na rocha e distribuídos nos *boudins* de quartzo e segregações dos quartzitos. Ocorre arsenopirita, galena, esfarelita, pirita, calcopirita e pirrotita. Arsenopirita e pirita possuem uma maior correlação com o ouro (DAITX e ZARNADO, 2000).

A mineralogia da jazida de ouro da RPM, tanto em relação aos minerais essenciais, quanto em relação aos acessórios está composta predominantemente por mica branca muscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_8$), illita e quartzo (SiO_2). Estes representam mais de 85% da composição do minério. Os minerais acessórios são clorita ($Mg_3(SiO_{10})(OH)_2 \cdot Mg_3(OH)_6$), siderita ($FeCO_3$), albita ($Na(AlSi_3O_6)Ab_{90}An_{10}$), rutilo (TiO_2) e caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$), cada mineral é representado por uma porcentagem abaixo de 5%. Os minerais traços são a galena (PbS), esfarelita (ZnS), ilmenita ($FeTiO_3$), geothita ($HFeO_2$), pirita (FeS_2) e arsenopirita ($FeAsS$). A matéria carbonosa pode atingir até 1% de todo o minério (VIEIRA e OLIVEIRA, 1988; COSTA, 1997).

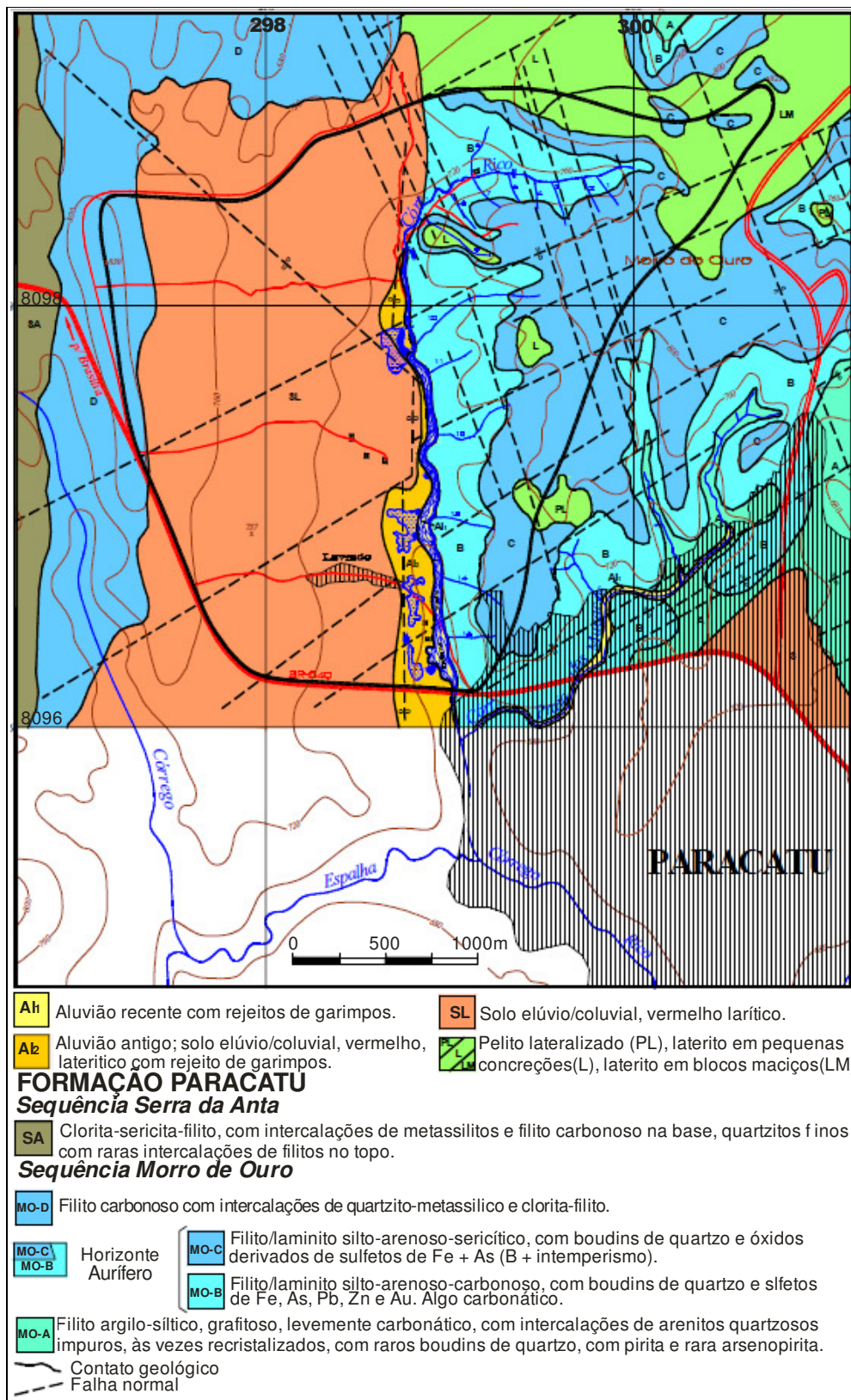


Figura 6 – Mapa geológico da Rio Paracatu Mineração (modificado do Serviço Geográfico do Ministério do Exército/1972).

3.3.

Caracterização mineralógica

A complexidade crescente dos minérios, tanto física quanto quimicamente, tem exigido que estudos de caracterização precedam o desenvolvimento de seus processos de concentração. Também, aquela que poderia ser chamada de caracterização de acompanhamento ou monitoramento dos produtos de cada uma das etapas do processo de concentração faz-se imprescindível, não apenas pelas questões intrínsecas aos minérios, mas pela necessidade de associar melhor produto ao menor custo e à menor geração de impacto ambiental.

As técnicas de estudo de caracterização de minérios são inúmeras e de grau de complexidade que varia desde o uso de avançados microscópios eletrônicos, tomógrafos computadorizados, até uma análise granulométrica em peneiras ou análise química por via úmida.

Um fator importante para a eficácia da informação a ser obtida com o uso dessas técnicas é a concentração prévia das diversas fases minerais que constituem um minério. Separação magnética, separação eletrostática e separação por diferença de densidade são técnicas utilizadas individualmente ou combinadas entre si para se atingir o objetivo de se individualizarem, ao máximo, os minerais presentes em um minério. Entre essas técnicas, a separação por diferença de densidade está presente em quase todas as metodologias de caracterização de minérios.

3.3.1.

Separação em meio denso

A separação por meio denso baseia-se na diferença de densidade existente entre os minerais presentes na amostra. A separação pode ser estática ou dinâmica.

É um processo aplicado na separação de minerais segundo suas massas específicas mediante a utilização de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou suspensão estável de densidade pré-determinada. O meio denso utilizado deve apresentar uma densidade intermediária entre as das espécies minerais a separar, de maneira que os minerais com densidade inferior flutuem e aqueles com densidade superior afundem. O processo é mais aplicado para partículas grossas (LUZ *et al.*, 1995).

3.3.2.

Separação magnética

A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para a concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério e uma remoção de sucata (LUZ, *et al*, 2004).

A atração magnética de um mineral, quando submetido a um campo magnético, varia com a sua composição química, isto é, com o seu índice de impurezas, as quais dependem da sua forma de ocorrência nos jazimentos minerais. A propriedade determinante nesse processo é a susceptibilidade magnética.

A propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso têm-se os minerais ferromagnéticos, os quais são fortemente atraídos pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se de diamagnéticos (LUZ, *et al*, 2004).

As operações de separação também podem ser desenvolvidas em via seca ou via úmida. Os equipamentos mais utilizados são os tambores, correias, rolos, carrosséis e filtros.

3.3.3.

Difratometria de raios X (DRX)

A difratometria de raios X é uma técnica rápida de análise utilizada principalmente para a identificação das fases cristalinas de um material e pode fornecer informações sobre as dimensões da célula unitária. A técnica permite visualizar padrões de difração de raios X em todos os tipos de substâncias, mas a informação obtida é mais rica no caso da análise de materiais cristalinos.

Com a análise de raios X, o que se identifica em princípio é a estrutura geométrica microscópica dos materiais (espaçamento interplanar). Quando uma substância cristalina é sujeita a um feixe de raios X incidindo sobre um determinado ângulo, os diferentes planos ou camadas de átomos ou íons dos

cristais refletem parte da radiação, sendo o ângulo de reflexão igual a ângulo de incidência. Para que as ondas refletidas pelos diferentes planos cristalinos estejam em fase, isto é, para que seja máxima a intensidade da radiação refletida, é necessário que se verifique certa relação entre o comprimento de onda da radiação, a distância entre os planos dos cristais ou distância interplanar e o ângulo de incidência, relação que é dada pela lei de Bragg.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Onde d é a distância entre os planos adjacentes, θ o ângulo de Bragg, n é um número inteiro, e λ o comprimento de onda dos raios X.

Assim, submetendo uma amostra cristalina a raios X de um determinado comprimento de onda e traçando um diagrama (difratograma) com a intensidade da radiação difratada em função do ângulo de incidência, obtém-se, através dos máximos de difração um conjunto de distâncias entre planos cristalinos, que é característico da substância cristalina que lhe deu origem. Por comparação destes valores com os de tabelas é possível identificar as substâncias cristalinas presentes na amostra. Além disso, a estimativa do tamanho do cristalito pode ser calculada pela fórmula de Scherrer a partir da largura a meia altura dos picos. A equação de Scherrer é representada da seguinte maneira.

$$t = (k \cdot \lambda) / (\beta \cdot \cos \theta) \quad (3.2)$$

Onde t é o tamanho do cristalito, β a largura a meia altura (em rad), k é a constante.

Esta técnica é muito utilizada na caracterização mineralógica de diferentes minérios. No trabalho de BERNDT (2008), a técnica foi utilizada para identificar minerais carregadores de titânio. BORGES, 2006; GRAVINA, 2009, confirmaram a ocorrência de minerais de titânio em seus trabalhos de caracterização com ajuda desta técnica.

3.3.4. Microscopia Ótica (MO)

Na caracterização de minérios a microscopia ótica consiste-se na observação completa e total de minérios por meio de microscópios ópticos. Permite obter informações sobre a superfície e projeção da estrutura interna. O trabalho em lupa ou microscópio estereoscópico permite a análise das amostras em grão, sem necessidade de se montar seções polidas ou delgadas. Os minerais são identificados por cor, brilho, hábito, clivagens, fratura, e é possível utilizar técnicas auxiliares diretas, como punção com alfinete para confirmar pintas de ouro ou delaminar micas e vermiculita, interação com imã, ou testes microquímicos.

A microscopia ótica de luz transmitida para minerais transparentes, e de luz refletida, para minerais opacos, são provavelmente os métodos de identificação de minerais mais tradicionais. Baseiam-se ambos na interação da luz com os minerais, e são bastante precisos e flexíveis para análises qualitativas. As análises exigem preparação especial das amostras, em seções delgadas (luz transmitida), polidas (luz refletida), ou delgadas polidas (ambas). É possível analisar fragmentos de rochas ou montagens de material particulado, embutido em resinas (NEUMANN; SCHENEIDER; NETO, 2002).

BORGES, 2006, identificou ilmenita com auxílio da microscopia ótica (luz refletida). MACHADO, 2009, também utilizou esta técnica (MO, luz transmitida) para identificar a ocorrência de rutilo nos sedimentos da Bacia de Curitiba.

3.3.5. Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios X é um método analítico baseado na detecção de emissão de raios X por átomos excitados. Este método é conhecido pela sigla XRF, que inglês significa *X-Ray Fluorescence Spectrometry*. O processo de emissão de raios X é constituído em duas etapas principais. A primeira etapa consiste na remoção de um elétron de uma camada interna do átomo. Isto ocorre quando os átomos das amostras são irradiados por fótons de raios X de alta energia; criando, nestes orbitais lugares vagos. Com a perda de um elétron, o átomo torna-se um íon instável. A segunda etapa consiste em preencher o espaço vago, criado pela remoção do elétron da camada interna do átomo por um elétron da camada externa do próprio átomo.

Esta transição é acompanhada pela emissão de um fóton de raios X, chamado fóton de fluorescente (HAVRILLA, 1998).

A desvantagem deste método está na dificuldade de detecção de emissões de elemento com número atômico inferior a 20 ($Z < 20$). Outra limitação é a interferência de matrizes cuja composição química nem sempre é conhecida.

A FRX é um método padrão de análises químicas, TORRES, *et al.*, 2008, caracterizaram os Basaltos Magmáticos do Paraná utilizando esta técnica. SOMMER, *et al.*, 2005, SOUZA, *et al.*, 2005, FERRON, *et al.*, 2010, identificaram a presença de titânio utilizando a FRX em seus diferentes estudos geoquímicos.

3.3.6.

Microscopia Co-localizada

A microscopia co-localizada consiste em uma técnica para construção de imagens multi-componente combinando imagens obtidas de diferentes modalidades de microscopia ou de um mesmo microscópio, mas em diferentes condições (GOMES *et al.*, 2005). Às vezes, a microscopia co-localizada é também chamada de microscopia multimodal o microscopia colaborativa (BONNET, 2004).

GOMES, 2005; GOMES, 2007; GOMES e PACIORNIK, 2009, conseguiram caracterizar diferentes tipos de minérios auxiliando-se nesta técnica.

3.3.7.

Automatização da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) baseada no Sistema de Liberação Mineral

A descrição quantitativa da mineralogia e texturas são temas importantes na mineralogia aplicada. Manual de métodos e análises de imagens no microscópio ótico são tecnologias baratas e adequadas para vários propósitos, mas em geral, um método mais avançado precisa de outras ferramentas especialmente quando se estuda mineralogia complexa ou traço, partículas finas ou, por exemplo, silicatos e carbonatos, que não podem ser definidos unicamente por análise de imagens no microscópio ótico. Em seguida, é favorável recorrer a um microscópio eletrônico de varredura (MEV), baseado no sistema de análise de imagens (BARBERY, 1991; MOEN *et al.*, 2003).

Conforme descrito por BARBERY (1991) JONES desenvolveu o conceito que os minerais podem ser identificados automaticamente no MEV ou

microsonda eletrônica na década de 1970 (BARBERY, 1991; JONES, 1987; JONES e GRAVILOLIC, 1970). Dos tipos de sinais mais adequados para esta aplicação são:

- Elétrons retro-espalhados (BSE): como resultado das interações inelásticas o elétron pode se tornar um elétron retro-espalhado (BSE), com uma energia máxima o igual à energia do elétron primário (neste caso ocorre somente uma única colisão). O elevado pico em torno dos elétrons primários é devido ao espalhamento Rutherford e este processo aumenta com o número atômico Z . Portanto, os elétrons retro-espalhados emitidos pela amostra refletem o valor médio de Z do material.
- Raios X característicos: O elétron do feixe incidente pode interagir com os elétrons de camadas mais interna causando a ejeção do mesmo e deixando uma vacância nesta camada. O átomo fica então num estado excitado (estado energético) e cuja tendência é voltar ao estado fundamental, em apenas 1 ps, através de uma série de transições permitidas dos elétrons de camada externas para preencher o vazio da camada interna. A energia do fóton de raios X emitido é uma função dos níveis de energia do átomo. Como o nível de energia dos átomos são bem definidos e característicos de cada tipo de átomo, a energia do fóton de raios X é específica de cada elemento e contém as informações sobre a composição química de cada espécie.

Diversos sistemas foram desenvolvidos para liberação mineral (JONES, 1987; PIGNOLET-BRENDOM e REID, 1988; KING, 1993; LASTRA *et al.*, 1998; PETRUK, 2000; GOTTLIEB *et al.*, 2000; GU, 2003 e BUTCHER, 2004). Os recentes avanços, particularmente *Background 22* em informática tem sido rápidos e fáceis de utilizar (GU, 2003).

Os sinais de BSE de um moderno MEV podem ser usados para gerar imagens de uma amostra a partir do qual os minerais mais importantes podem ser quantificados através de métodos modernos de análise de imagens. Cada grão delineado a partir de imagens de BSE pode ser identificado com a análise de raios X, ou posicionada no centro do grão ou recolhidos do varrido do grão inteiro.

3.3.7.1. Sistemas de análise mineral

A maioria dos sistemas desenvolvidos até agora fundamentam seus princípios na análise de imagem, contam com o auxílio de técnicas variadas, diferentes equipamentos de microscopia eletrônica, detectores de sinais e softwares altamente desenvolvidos para estes fines.

- O sistema desenvolvido por JONES (1987) no *Imperial College*, Londres, Reino Unido, representa uma introdução dos conceitos de análises de imagem linear, no qual o varrido linear é feito movendo a seção polida sobre um feixe de uma microsonda eletrônica (JONES e GRAVILOVIC, 1970; JONES e HORTON, 1979 e JONES, 1987). Quatro analisadores de comprimentos de onda dispersiva de raios X são utilizados para a coleta de dados primários, discriminação e identificação de minerais são baseadas na combinação de sinais a partir dos quatro espectrômetros.
- O sistema desenvolvido por PETRUK (1989; PETRUCK, 2000) é chamado MPSEM-IPS (*Microprobe - Scanning Electron Microscope - Image Processing System*). O sistema foi montado em CANMET, Ottawa, Canadá, qual é parte da *Natural Resources Canada*, consiste em uma microsonda, equipado com um analisador por dispersão de energia de raios X (EDS) e um sistema de análise de imagem *Kontron* (HETZNER, 1998). A análise é realizada a través da criação de BSE, variados níveis de cinza para os diferentes minerais. Para minerais com sobreposição de tonalidades, é usado EDS para estabelecer diferencias que são detectados pelos raios X. Análise de imagem e aritmética é realizada sobre as imagens de BSE e mapeamento pontual para discriminar os diferentes minerais, permitindo também a análise de liberação mineral (LASTRA *et al.*, 1998).
- O PTA (*Particle Texture Analysis*), sistema desenvolvido na Universidade *Norwegian* de Ciência e Tecnologia (NTNU) (MOEN *et al.*, 2006) baseia-se nos mesmos princípios do anterior sistema, mas usa um software comercial para aquisição de dados. A imagem BSE é segmentada usando níveis de cinza e sobreposição e semelhantes níveis de cinza para os minerais são resolvidos com

análises de raios X. Esta parte do sistema baseia-se no software *Oxford Instruments Inca Feature*. O banco de dados e as imagens são então pos-processadas off-line pelo software ATP que realiza as análises de liberação e associação mineral usando análise de imagem e informação de raios X do banco de dados. PEJMAN, et al., 2009, utilizaram este sistema para realizar um seguimento nos seus estudos de moagem.

- O sistema QEM*SEM (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*), desenvolvido ao longo de 20 anos pela divisão de Engenharia Mineral e de Processos do CSIRO da Austrália é baseado sobre um conceito diferente. Tem sido objeto de uma série de trabalhos desde o trabalho inicial de GRANT e sua equipe. Apresentado o conceito em 1976 (BARBERY, 1991). O sistema foi transferido para uma companhia independente, continuando a tecnologia através do sistema QEMSCAN e alguns produtos relacionados. O sistema consiste de um MEV equipado com quatro detectores de raios X. O princípio da tecnologia do sistema QEMSCAN é a imagem de partículas por meio do sinal de BSE, realizando análise de imagem para descrever cada partícula e fazer imagens individuais deles. O sistema QEMSCAN identifica o mineral presente em cada ponto dentro dessas imagens pelo rápido recolhimento do espectro de energia dispersiva de raios X que são analisadas para indicar a composição de cada ponto (BUTCHER, 2004; GOTTLIEB *et al.*, 2000). CREELMAN e WARD, 1996; GOODALL, et al., 2005 e BENVIE, 2007, realizaram diferentes estudos de caracterização utilizando este sistema.
- O sistema MLA (*Mineral Liberation Analyzer*), desenvolvido por GU e seu grupo no *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*, JKMRRC, da Universidade de Queensland, Austrália (GU, 2003, 2004) também é baseado em análise de imagens de BSE e discriminação mineral por análises de raios X. O problema de tocar partículas inicialmente é superado por uma função de desaglomeração automatizado que remove o *background* e utiliza a forma das partículas para avaliar se uma partícula está aglomerada. O processo de desaglomeração tem diferentes estratégias de rompimento. A segmentação de imagem do MLA, em seguida, apresenta grãos mais o menos homogêneos em níveis

de cinza de cada imagem de partícula. Sobreposição e similares tonalidades de cinza para os minerais são resolvidas com análise de raios X. O sistema MLA normalmente executa uma análise de raios X para cada região de nível de cinza diferente em uma partícula. Se dois minerais de semelhantes níveis de cinza, mas de composição química diferente, é usado o mapeamento de raios X sendo mais demorado, e evitados quando os níveis de cinza são únicos (GU, 2003). DEYSEL, 2007 utilizou o sistema MLA para estudar areias minerais identificando diferentes minerais portadores de titânio presentes nas areias em especial, pseudorutilo, ilmenita alterada e leucoxênio.

3.3.8.

Mineral Liberation Analyzer - MLA

O sistema MLA utiliza técnicas de microscopia eletrônica de varredura, elétrons retro-espalhados junto com a análise por dispersão de energia (EDS). Em segundo lugar, o MLA usa os controles de brilho e contraste do MEV. Quando usados corretamente, os elementos localizados na tabela periódica terão um número definido de brilho. Segundo a teoria dos elementos número atômico baixo, como carbono, oxigênio e silício, como outros, tenderá a ser menos brilhante quando comparada com elementos de número atômico alto, como cobre, ouro, chumbo e zinco. Esses elementos tendem a ser mais brilhante quando essas técnicas são utilizadas. Esta tecnologia permite ao usuário fazer uma variedade de exames minerais. Esses exames incluem uma pesquisa mineralógica geral para determinar e quantificar como, por exemplo, silicatos contendo diferentes minerais ou diferentes fases mineralógicas.

Outras vantagens do sistema MLA é a capacidade de quantificar os minerais dentro das amostras. Durante análise, o software leva em conta o tamanho das partículas. O software analisa e registra as partículas dentro da amostra, geralmente entre 10.000 e 20.000 partículas dependendo do tamanho inicial de malha. Ao mesmo tempo, um padrão de EDS é recolhida e guardada para o futuro análise quantitativa elementar. Após a coleta dos dados, os minerais são micro-sondados usando MEV e medidas analíticas padrão para uma verificação mineral se for necessário. O diagrama da Figura 7 mostra em resumo de como são geradas as imagens no sistema MLA.

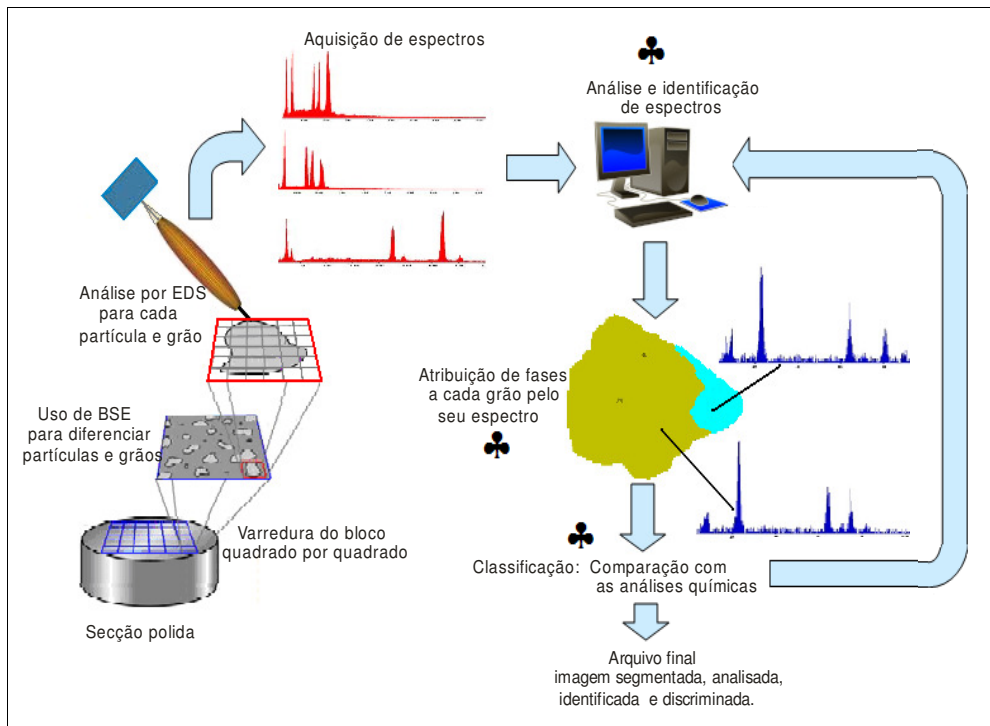


Figura 7 – Diagrama de aquisição de imagens usada pelo sistema MLA. ♣: Papel fundamental do analisador na toma de decisões.

As amostras são finalmente quantificados mineralogicamente utilizando o software do MLA (*Database Marker* 2008). Esta prática padrão é feita repetidamente até que o conteúdo total desconhecido é menos 0,1%. Vários programas fazem parte do sistema, cada um deles cumprem uma função diferente e eles são:

- MLA *Data View* 2008;
- MLA *Database Marker* 2008;
- MLA *Measurement* 2008;
- MLA *Monitor* 2008;
- MLA *ParticleX* 2008;
- MLA *Process Tool* 2008;
- MLA *System Manager* 2008;
- MLA XSTS_NEW 2008.

3.3.8.1.

Identificação de minerais: MLA *ParticleX*

Este programa exige apenas um número pequeno de análises de raios X para definir a composição mineral de uma partícula. É muito eficaz e pode ser aplicada à maioria de amostras (Figura 8). No entanto, este método não pode ser usada para analisar amostras em que duas ou mais minerais têm o mesmo número atômico médio ($\bar{Z}$) e estão associadas (em contacto uns com os outros). Por exemplo, se uma partícula contém pentlandita e calcopirita ($\bar{Z}$: 23,36 e 23,54), a segmentação não vai ser capaz de detectar os limites entre estes dois minerais, portanto, não será apenas um raio X coletados para essa partícula. O espectro de raios X não irá corresponder à pentlandita nem o da calcopirita. O sistema MLA usa o método de mapeamento de raios X de partículas para lidar com estes tipos de amostra.

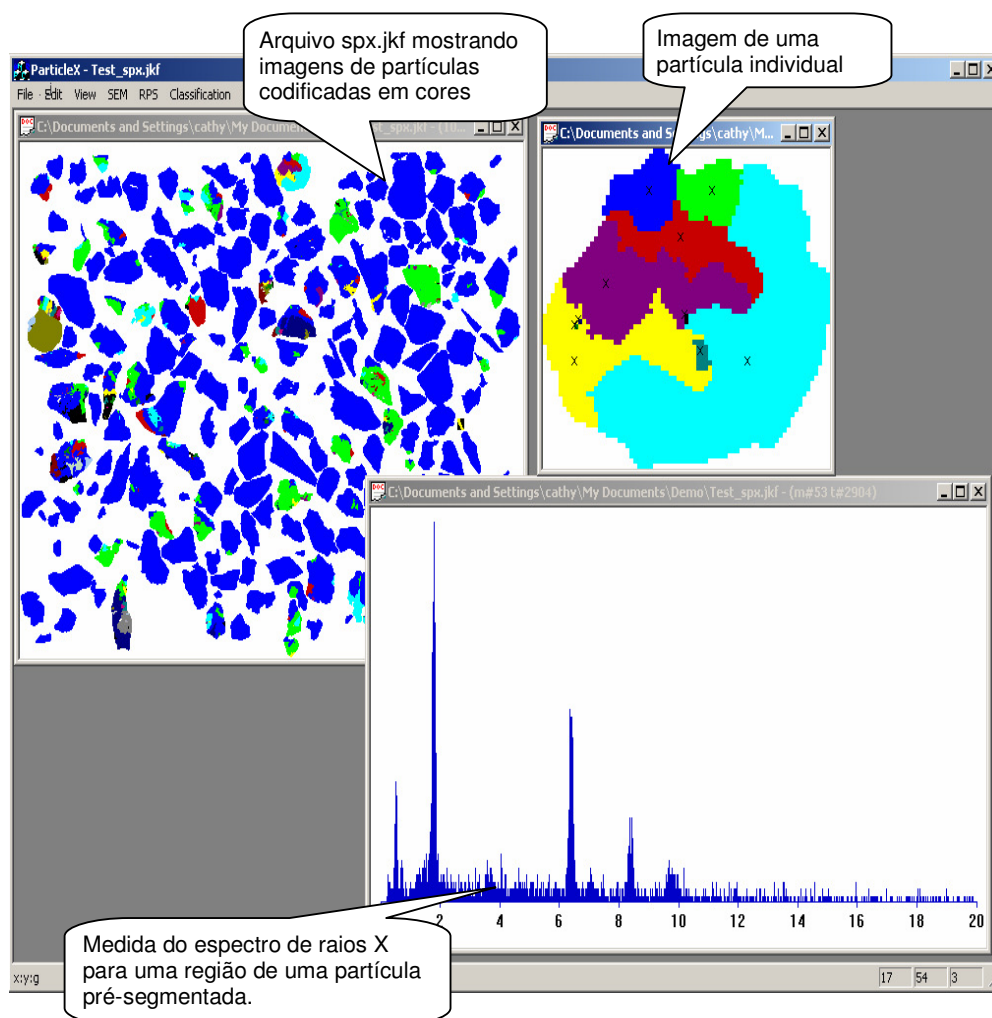


Figura 8 – Identificação de minerais: MLA *ParticleX*.

3.3.8.2.

Processamento de imagens: *Image Processing Tool*

É um programa encarregado de processar as imagens obtidas mediante o anterior programa, no entanto, este processamento pode ser interativo se for necessário verificar alguns resultados já obtidos. A Figura 9 mostra a janela do programa *MLA Image Processing Tool*, com uma seleção de janelas abertas para ilustrar a gama de informações de imagens de BSE juntamente com seu histograma de tons de cinza antes e após o retiro do *background*, também mostra a codificação de cores classificadas para cada mineral e a área porcentual modal dos minerais.

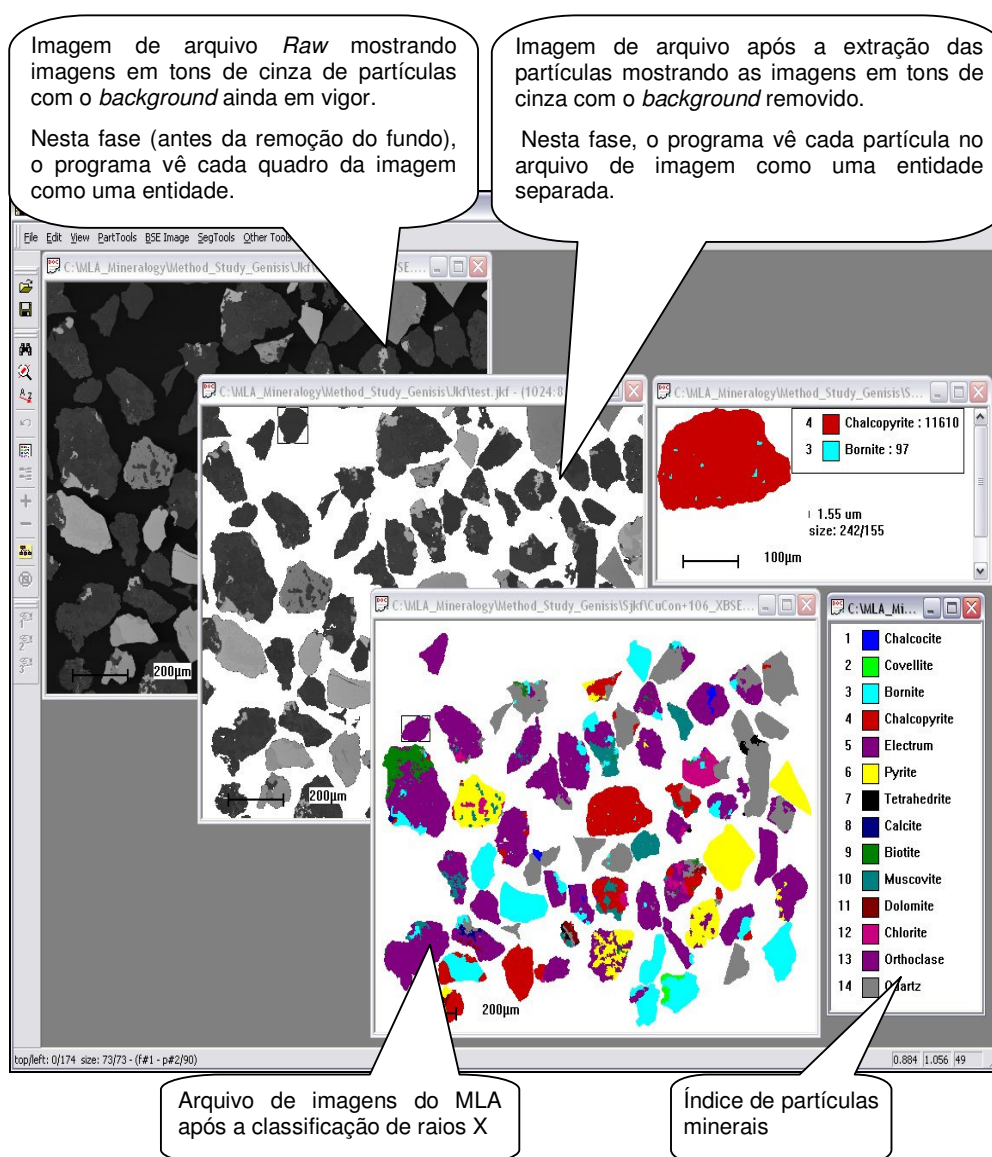


Figura 9 – Processamento de imagens: *MLA Image Processing Tool*.

3.3.8.3. MLA Mineral Database Maker 2008

O MLA Mineral Database Maker 2008 é encarregada de classificar todos os minerais presentes com respeito à densidade, número atômico médio ($\bar{Z}$) e a composição química de cada mineral. A janela da classificação realizada na amostra da RPM mostra-se na Figura 10.

Base de dados global do MLA Mineral Database Maker 2008

Classificação para a amostra da RPM.

I...	Mineral	De...	Z	Chemical Formula
1	Acanthite	7,3	42,...	Ag ₂ S
2	Albite	2,62	10,...	NaAlSi ₃ O ₈
3	Allargentum	10	47,...	Ag ₆ Sb
4	Altaite	8,2	70,...	PbTe
5	Andalusite	3,2	10,...	Al ₂ SiO ₅
6	Alunite	2,7	11,...	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
7	Anglesite	6,4	59,...	PbSO ₄
8	Anhydrite	3	13,...	CaSO ₄
9	Ankerite	3	14,66	CaFe(CO ₃) ₂
10	Anorthite	2,76	11,...	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
11	Antimony	6,7	51	Sb
12	Apatite	3,2	14,...	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F
13	Aragonite	2,95	12,...	CaCO ₃
14	Argentite	7,3	42,...	Ag ₂ S
15	Arsenopyrite	6	27,...	FeAsS
16	Atacamite	3,76	21,...	Cu ₂ Cl(OH) ₃
17	Azurite	3,77	19,...	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂
18	Barite	4,4	37,...	BaSO ₄
19	Biotite	3	13,...	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(O...
20	Bismuth	9,8	83	Bi
21	Bismuthinite	6,5	70,...	Bi ₂ S ₃
22	Bornite	5,07	25,...	Cu ₅ FeS ₄
23	Boulangerite	6	61,...	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁
24	Boumonite	5,8	53,...	CuAgPbSbS ₃
25	Bravoite	4,6	21,...	(Ni,Fe) ₂ S ₂
26	Brochantite	3,9	20,...	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆
27	Brucite	2,39	9,4...	Mg(OH) ₂
28	Calaverite	9,35	63,...	AuTe ₂
29	Calcite	2,71	12,...	CaCO ₃
30	Cassiterite	7	41,...	SnO ₂
31	Cerussite	6,5	65,...	PbCO ₃
32	Chalcocite	5,7	26,...	Cu ₂ S
33	Chalcopyrite	4,2	23,...	CuFeS ₂
34	Celestine	4	23,...	SrSO ₄
35	Chlorargyrite	5,6	39,58	AgCl

Element	Weight%
Fe	36,80 %
O	31,60 %
Ti	31,60 %
Total	100,00%

Figura 10 – Base de dados: MLA Mineral Database Maker 2008.

3.3.9. Análises de imagens digitais

A análise de imagens é um ramo da estereologia, isto é, a avaliação quantitativa ou qualitativa de feições geométricas tridimensionais expostas em imagens bidimensionais. Essa citação remete o leitor ao conceito de diâmetro equivalente, pois quando a análise de imagem é utilizada na determinação do tamanho de uma partícula, alguma característica geométrica de sua feição bidimensional (e.g. área projetada) é relacionada a uma única dimensão linear: o diâmetro equivalente (ALLEN, 1997).

Existem, basicamente, duas formas de se usar a análise de imagens para contagem e determinação de tamanho de partículas: manualmente ou usando sistemas de análise de imagens. Contar ou determinar tamanho de partículas “manualmente”, por meio de análise de imagens, consiste em comparar partículas com retículos previamente calibrados via microscópio, sendo, por conseguinte, considerado o método absoluto de determinação de tamanho de partículas, pois se trata da única técnica pela qual se observam e se medem partículas individualmente. No entanto, essa característica torna sua utilização tediosa e extremamente lenta, logo, seu emprego deve restringir-se a avaliações qualitativas e a análises preliminares de amostras (ALLEN, 1997).

As imagens mais utilizadas são as de microscopia eletrônica de varredura ou óticas. No caso do MEV, que é o mais utilizado em tecnologia mineral, são utilizadas as imagens de elétrons retro-espalhados, onde o nível de cinza de cada pixel é proporcional ao número atômico médio da fase naquele ponto. A análise de imagens óticas é praticamente restrita às de luz refletida, em amostras planas geralmente é escolhido um dos canais de cor (vermelho, verde ou azul), no qual o contraste entre as fases seja maior, e passível de separação. Dependendo da configuração, o canal composto também pode ser utilizado.

O interesse em métodos de processamento de imagens digitais decorre de duas áreas principais de aplicação: melhoria da informação visual para a interpretação humana e o processamento de dados contidos na imagem para percepção automática através de máquinas ou avaliações quantitativas, as quais envolvem contagens e medidas de objetos de interesse (GONZALEZ, 2002).

3.3.10. Liberação mineral

Liberação é um fator essencial que afeta fortemente a recuperação e grau de produtos. Se houver liberação inadequada, a separação eficaz será limitada. Liberação depende da microestrutura (Textura) do minério, tais como tamanho de partícula, distribuição granulométrica de minerais valiosos, as relações mútuas entre o valor mineral e os minerais de ganga, e a ligação entre minerais valiosos e ganga.

A textura tem duplo significado na caracterização de partículas minerais, pois é amplamente conhecida tanto como a distribuição espacial dos diferentes minerais, como de diferentes grãos cristalinos de um mesmo mineral em uma partícula. Porém muitos autores reservam a palavra *texture* para designar o primeiro tipo de distribuição e usam a palavra *fabric* descrever a orientação cristalina de populações minerais (PIRARD *et al.*, 2007). A respeito do primeiro significado, (KING e SCHNEIDER, 1998) demonstraram que a textura mineralógica dos cristais tem uma influência decisiva na distribuição de liberação.

O espectro de liberação é um dos índices básicos mais importantes nos processos de separação de partículas como processamento mineral e tratamento de resíduos, também é usado para a estimativa de moagem e na seletividade de processos de separação. O espectro de liberação é obtido mediante a medição das partículas liberadas e das partículas compostas presentes em um material (OKY, *et. al.*, 2004).

O conhecimento da distribuição de liberação em material particulado, que é processado em plantas de processamento mineral pode ser usado com bastante facilidade para diagnosticar problemas de funcionamento, e desenvolver estratégias para um melhor funcionamento (KING e SCHNEIDER, 1998).

O aspecto de liberação exige o conhecimento da distribuição no espaço de uma fase mineral dentro de outros e depende da coerência de cada fase e a aderência entre eles, como descrito por KING (2001). Essa relação das fases minerais determina a probabilidade de cada partícula pequena a adquirir certa classe após a ruptura de uma partícula maior. ANDREWS e MIKA (1975) determinaram também os limites dos graus de seus possíveis antecessores (região de alimentação) e descendentes (região viável) de uma partícula em um

diagrama de tamanho versus teor, conhecido como "Diagrama de Andrews-Mika". É importante esclarecer que o tema liberação inclui três tópicos distintos, medição, previsão e simulação.

A observação comum que as partículas compostas são recuperados mais lentamente do que plenamente libertadas foi relatado por GAUDIN (1939). No entanto, a medição da liberação de partículas para a otimização de circuitos de separação industrial só foi alcançado nos últimos anos, com o advento da microscopia eletrônica de varredura e análise de imagem de seções polidas de partículas de um determinado minério (SUTHERLAND e GOTTLIEB, 1991; BARBERY, 1991; KING e SCHNEIDER, 1993).

Existem muitas ferramentas disponíveis para análise de liberação mineral, pode ser classificado em técnicas de uma dimensão (1D) e duas dimensões (2D) como microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) (SUTHERLAND e GOTTLIEB, 1991; ROBINSON *et. al.*, 2000; LIN e MILLER, 2001; GU, 2003). Recentemente, foram desenvolvidas técnicas em terceira dimensão (3D) como a tomografia de raios X (MILLER e LIN, 2004; FANDRICH *et. al.*, 2007; VIDELA *et. al.*, 2007).

A interpretação espacial de 1D e 2D extraím informações das seções polidas e podem ser realizados por uma variedade de procedimentos estereológicos (SCHNEIDER *et al.*, 1991; BARBERY, 1991; KING e SCHNEIDER, 1993; KING, 1994). O tema da correção estereológica na análise de liberação mineral foi analisado exaustivamente por diversos modelos para proporcionar meios corretivos para 1D e 2D. Recentemente estão sendo realizadas medições diretas de liberação em 3D, mediante tomografia computadorizada por raios X, estas técnicas estão sendo utilizadas para a análise de liberação mineral na Universidade de Utah (MILLER e LIN, 2004).

Varias aplicações envolvendo liberação mineral são realizados atualmente, identificando problemas de funcionamento e desenvolvendo diferentes estratégias para soluçona-os, principalmente na área de cominuição e processamento mineral. VIZCARRA, *et., al.* 2010 realizaram estudos de liberação mineral nos mecanismos de quebra de um minerio sulfetado. MOHAMED, *et., al* 2009 estudaram as características de liberação na flotação de rocha fosforica da Florida.

3.3.10.1.

Teor limite - Liberação/Curva de recuperação

Existem diferentes fatores que influenciam na separação perfeita, ou melhor, separação de minerais, um desses fatores é o estado de liberação da população de partículas a serem separadas.

Em princípio o teor limite - liberação/curva de recuperação pode ser calculada a partir da análise de liberação mineral. Esta análise mineral pode ser realizada mediante o estudo de seções polidas, já seja por microscopia ótica, MEV ou Tomografia micro-computadorizado. Este tipo de gráfico é muito importante para avaliar a separação que pode ser alcançada por um material limitada apenas pela liberação (Figura 11).

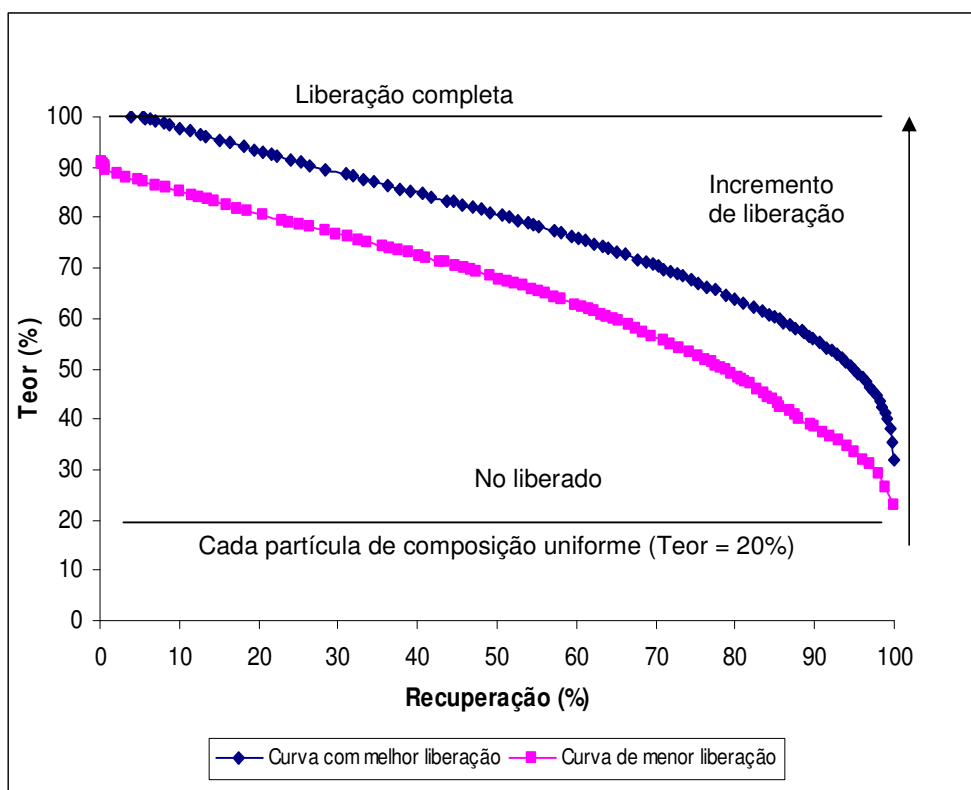


Figura 11 – Ilustração geral da variação do teor limite - liberação/curva de recuperação. Adaptação de MILLER, *et al.*, 2009.