



ESTUDO DE CASO - ESTUDOS DE PROCESSAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO A PARTIR DE MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO DENSITÁRIA

Fernanda Alves De Souza¹
Rafaela Mara Guedes²
Kelly Cristina Ferreira³
Adriano Jose De Barros⁴
Júnia Soares Alexandrino⁵

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Fernanda Alves De Souza, Rafaela Mara Guedes, Kelly Cristina Ferreira, Adriano Jose De Barros y Júnia Soares Alexandrino (2018): "Estudo de caso - estudos de processamento de rejeito de minério de ferro a partir de métodos de concentração densitária", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (septiembre 2018). En línea:

[//www.eumed.net/rev/caribe/2018/09/processamento-minerio-ferro.html](http://www.eumed.net/rev/caribe/2018/09/processamento-minerio-ferro.html)

RESUMO

O beneficiamento do minério de ferro é realizado por diversos processos, desde a cominuição, classificação até a concentração. A concentração se divide em física e química. No método físico se destaca a concentração gravítica (ou densitários), que definida como um processo onde as partículas de formas, tamanhos e densidades diferentes se separam por ação das forças centrífugas ou de gravidade. Diversos equipamentos são utilizados, destacando-se jigues, mesas oscilatórias e espirais concentradoras. A mesa oscilatória é considerada, de modo geral, o equipamento mais eficiente para o tratamento de materiais com granulometria fina, é empregado a várias décadas para a concentração gravítica de minérios e carvão, sendo um equipamento disseminado por todo mundo. Este trabalho tem como objetivo usar dos mecanismos de separação gravítica para trabalhar com o rejeito de minério de ferro da planta da pedreira Um Valemix. Situada na cidade de Catas Altas, a empresa vem realizando, desde 2010, a extração e o beneficiamento de Hematita compacta, Itabirito duro e Itabirito friável. Avaliou-se com este estudo o emprego de métodos densitários para o aumento da recuperação final de uma planta de minério de ferro, através do reprocessamento do rejeito, tendo um resultado satisfatório com a recuperação metalúrgica igual a 81,8% com teor de ferro de 53,4%. Onde este foi caracterizado através da análise granulométrica, seguido de deste densitário e finalizando com avaliação dos resultados obtidos. Este estudo tratou-se de uma pesquisa aplicada, quali-quantitativa, explicativa e bibliográfica.

Palavras – chaves: Concentração Física. Mesa Oscilatória. Métodos Densitários. Beneficiamento.

¹ Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Estadual de Minas Gerais.

² Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Estadual de Minas Gerais

³ Professora, Universidade Estadual de Minas Gerais, Doutoranda pela UFMG, Orientadora da pesquisa

⁴ Doutorando Geografia e Tratamento de Informação Espacial (PUC Minas/BH) - Professor da UEMG Unidade João Monlevade – E-mail: adrianojosedebarras@gmail.com.

⁵ Doutorado em Tecnologia Mineral pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor na UEMG. E-mail: juniaalexandrino@yahoo.com.br

ABSTRACT

The process of iron ore is carried out by various processes, from a comminution, a classification to a concentration. A division is divided into physics and chemistry. In the physical method gravitational concentration (or densities) is defined as a process where the particles of different shapes, sizes and densities are separated by centrifugal forces or gravity. Several equipment are used, especially jigs, oscillatory tables and concentrating spirals. The oscillating table is considered, in general, the most efficient equipment for the treatment of materials with fine granulometry, has been used for several decades for a gravitational concentration of minerals and coal, and is widespread worldwide. This work aims to use the mechanisms of gravitational separation for the work with the iron ore tailings from the plant at the Valemix One quarry. Located in the city of Catas Altas, the company has been carrying out, since 2010, an extraction and the processing of compact hematite, hard itabirite and friable itabirite. This study evaluated the use of densification methods to increase the final recovery of an iron ore plant through the reprocessing of the waste, having a satisfactory result with metallurgical recovery equal to 81.8% with an iron content of 53.4%. Where this was characterized through the granulometric analysis, followed by this density and finalizing with evaluation of the results obtained. This study was an applied research, quali-quantitative, explanatory and bibliographical.

Key words: Physical Concentration. Oscillatory Table. Density Methods. Beneficiation.

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é o recurso não renovável mais utilizado na produção de outros bens, sendo este o mais procurado e explorado pela civilização moderna. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro e Metais Básicos - SINFERBASE, em 2017 de janeiro a abril o Brasil vendeu no mercado nacional um total de 8.372 Mt (Milhares de Toneladas) de minério de ferro. Em relação ao mesmo período de 2016 houve um aumento de 3,5% nas vendas. As exportações brasileiras atingiram o valor de 105.354 Mt (Milhares de Toneladas) de janeiro a abril de 2017, comparando com o mesmo período em 2016, as exportações atingiram o valor de 99.880 Mt (Milhares de Toneladas). As principais empresas produtoras foram Anglo American e Vale e Coligadas (SINFERBASE, 2017).

Localizado na região central de Minas, na borda sul do Cráton São Francisco e constituído por rochas arqueanas, o Quadrilátero Ferrífero é uma das regiões mais importantes do Brasil, pois possui uma das principais concentrações de minério como, por exemplo, ouro, ferro, manganês, entre outros, sendo que o ferro ocupa uma posição de destaque.

Os minérios de ferro encontram-se hospedados em Formações ferríferas bandadas (Banded Iron Formations - BIF). O termo BIF é uma nomenclatura internacionalmente usada para designar sedimentos e metassedimentos químicos finamente bandados constituídos por alternância de chert ou quartzo e óxidos de ferro (JAMES, 1955).

O beneficiamento do minério de ferro é realizado por diversos processos, desde a cominuição, classificação até a concentração. A concentração se divide em física e química. No método físico se destaca a concentração gravítica (ou densitários), que definida como um processo onde as partículas de formas, tamanhos e densidades diferentes se separam por ação das forças centrífugas ou de gravidade.

Diversos equipamentos são utilizados, destacando-se jigues, mesas oscilatórias e espirais concentradoras.

A mesa oscilatória consiste em um deque de madeira revestido com um material com alto coeficiente de fricção (borracha ou plástico), parcialmente coberto com ressaltos, inclinado e sujeito a um movimento assimétrico na direção dos ressaltos, por meio de um mecanismo que provoca um aumento da velocidade no sentido da descarga do concentrado e uma reversão súbita no sentido contrário, diminuindo suavemente a velocidade no final do curso (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

Observando separadamente a área de atuação do mecanismo de separação na mesa oscilatória compreenderemos melhor seu funcionamento. As partículas minerais alimentadas transversalmente aos *riffles* sofrem o efeito do movimento assimétrico da mesa, o que resulta em um deslocamento das partículas para frente, as pequenas e pesadas deslocam-se mais que as grossas e leves. Por causa do movimento assimétrico e pela turbulência da polpa através dos *riffles*, as partículas estratificam-se, comportando-se este leito como um pequeno jigue com sedimentação retardada e consolidação intersticial, fazendo com que os minerais pesados e pequenos fiquem mais próximos à superfície que os grandes e leves.

A mesa oscilatória é considerada, de modo geral, o equipamento mais eficiente para o tratamento de materiais com granulometria fina, é empregado a varias décadas para a concentração gravítica de minérios e carvão, sendo um equipamento disseminado por todo mundo.

Os processos densitários tiram partido das diferenças de densidades entre as espécies minerais que se quer separar.

Os rejeitos são consequências inevitáveis dos processos de tratamento do minério, estes produzidos, paralelamente ao produto final, impactam diretamente o meio ambiente e por esse motivo é uma das grandes preocupações das empresas, que por sua vez buscam minimizar estes impactos e os custos associados aos processos de disposição desse material.

Este trabalho tem como objetivo usar dos mecanismos de separação gravítica para trabalhar com o rejeito de minério de ferro da planta da pedreira Um Valemix. Situada na cidade de Catas Altas, a empresa vem realizando, desde 2010, a extração e o beneficiamento de Hematita compacta, Itabirito duro e Itabirito friável.

Avaliou-se com este estudo o emprego de métodos densitários para o aumento da recuperação final de uma planta de minério de ferro, através do reprocessamento do rejeito anteriormente gerado. Onde foi caracterizado o rejeito do minério de ferro através da análise granulométrica realizado por peneiramento a seco na peneira vibratória com malha utilizando o padrão da série Tyler, seguido de deste densitário com o uso da mesa oscilatória para separação do minério de interesse e finalizando com avaliação dos resultados obtidos através análises.

Este estudo tratou-se de uma pesquisa aplicada quanto a natureza do trabalho. Quanto à abordagem, essa pesquisa possui aspectos qualitativos e quantitativos. Sendo classificada como quali-quantitativa. Ainda vale ressaltar que, esta foi uma pesquisa explicativa e que quanto aos procedimentos técnicos utilizados classificou-se como uma pesquisa bibliográfica.

A seguir serão abordados no referencial teórico tópicos como aspectos do método densitário, atuação do mecanismo de separação na mesa oscilatória, bem como os critérios e eficiência de

concentração gravítica. Também será demonstrado a metodologia de pesquisa empregada, os materiais e métodos utilizados e os resultados e discussões obtidos. Ainda apresenta considerações finais e todas as fontes de pesquisa para realização deste trabalho.

2. Aspectos do método densitário

As etapas de classificação por tamanho envolvem operações de peneiramento e classificação em meio fluido. São realizadas com o objetivo de adequar, juntamente com as etapas de cominuição, a granulometria dos minérios para um estágio posterior de concentração. No classificador, são obtidos dois produtos: *overflow* (tamanhos menores) e o *underflow* (tamanhos maiores). No peneiramento, a metodologia mais usada na mineração para classificação mais grosseira, são grelhas (grades), peneiras rotativas e peneiras vibratórias. (ALBUQUERQUE; MORAIS; LADEIRA, 2014).

Após as etapas de fragmentação e classificação, vem à concentração mineral. Nessa etapa, ocorre a separação dos minerais valiosos (úteis) dos minerais de ganga (contaminantes) presentes no minério. É realizada em sistemas dinâmicos em que uma resultante de forças confere diferentes caminhos aos minerais com diferentes propriedades, acarretando a separação destes. Para isso, explora-se determinada propriedade dos minerais como brilho, cor, peso específico, condução de cargas, susceptibilidade magnética e propriedades de superfície (naturais ou induzidas). Conforme a propriedade explorada, esses métodos dividem-se em gravíticos, elétricos, magnéticos, de superfície, dentre outros (PERES et al., 2007).

Uma grande variedade de aparelhos de concentração gravimétrica tem sido desenvolvida ao longo de mais de dois milênios, considerando o mecanismo dominante na separação, os diversos aparelhos são classificados em três grupos principais: densidade; estratificação e escoamento em película d'água (SAMPAIO ; TAVARES, 2005).

O primeiro diz respeito aos processos em que as partículas são imersas em um banho contendo uma suspensão com densidade intermediária (meio-denso real ou autógeno), sendo que algumas partículas afundam e outras flutuam. O grupo cujo mecanismo dominante é a estratificação é formado por diferentes tipos de jig, onde a separação dos estratos (que antecede à separação dos produtos) é resultado da pulsação do fluido na direção da força de campo. O grupo mais numeroso de equipamentos de separação gravimétrica é aquele em que a concentração é realizada como resultado do movimento diferencial das partículas em escoamento em película de água. Fazem parte desse grupo as mesas concentradoras, as espirais, o cone Reichert e o Multi-Gravity Separator (MGS). (SAMPAIO ; TAVARES, 2005).

2.1 Critérios e eficiência de concentração gravítica.

A concentração gravítica pode ser definida como o processo no qual, partículas de diferentes tamanhos e densidades são separadas umas das outras através da força da gravidade ou através da

força centrífuga. A natureza dos processos é tal que a classificação por tamanho e forma é uma parte inerente do processo em adição à separação baseada na densidade. A natureza ao longo do tempo vem praticando esta forma de concentração através da separação de minerais pesados e relativamente indestrutíveis tais como ouro, platina, cassiterita, ilmenita, zircão, diamante, em depósitos de pláceres. Uma vez livre de sua rocha fonte, estes minerais são sujeitos à ação do vento e da água, produzindo uma classificação e concentração dos minerais pesados (WEISS, 1985).

Segundo Wills (2006), os métodos de concentração gravítica declinaram em importância na primeira metade do século passado devido ao desenvolvimento do processo de flotação, que permite o tratamento seletivo de minerais complexos de baixo teor. Permaneceram, no entanto, como principal método de concentração de ferro e minério de tungstênio e são amplamente utilizados para o tratamento de carvão e minério de estanho e muitos minerais industriais.

Recentemente muitas companhias têm reavaliado os sistemas de concentração gravítica devido ao aumento de custos de reagentes de flotação, à simplicidade relativa dos processos e ao fato de que estes métodos produzem pouca poluição ao meio ambiente quando comparados com os demais (WILLS, 2006).

Uma estimativa aproximada da aplicabilidade da concentração gravítica para a separação de um par de minerais de diferentes densidades pode ser determinada através do critério de concentração (C_c), desconsiderando o fator de forma das partículas minerais. Este método foi definido por Taggart baseado na taxa de sedimentação de duas partículas. (WILLS, 1997).

$$C_c = \left| \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_L - \rho_f} \right|, \text{ Onde:}$$

ρ_s : Densidade do mineral pesado

ρ_L : Densidade do mineral leve

ρ_f : Densidade do fluido

A seguir, na tabela 1, é apresentada a correlação do valor obtido através da equação do critério de concentração e a faixa granulométrica de aplicabilidade do mesmo.

Critério de concentração	Aplicabilidade
>2,5	✓ Separação fácil até 0,074 mm.
2,5 a 1,75	✓ Separação efetiva até 0,150 mm.
1,75 a 1,50	✓ Separação possível até 1,64 mm, porém difícil.
1,50 a 1,25	✓ Separação possível até 6,3 mm, porém difícil.
<1,25	✓ Separação extremamente difícil.

Tabela 1- Correlação entre o critério de concentração e a granulometria de aplicabilidade da concentração gravítica. (Peres et al.; 2000)

Considerando o par, hematita e sílica, cujas densidades são respectivamente 5,20 e 2,60 e considerado o meio fluido como sendo a água cuja densidade é igual a um, tem-se que o critério de concentração é igual 2,62 e de acordo com a tabela 1, logo se tem uma separação fácil até 0,074mm (BARCELOS, 2010).

A eficiência da separação gravítica também é influenciada pela forma das partículas. Segundo Burt (1984), para incluir o efeito das formas das partículas a serem separadas, o critério de concentração deve ser multiplicado por um fator de razão de forma (FRF). (BARCELOS, 2010).

$$C_c = \left| \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_L - \rho_f} \right| \cdot FRF$$

$$FRF = \frac{\zeta_D}{\zeta_L}, \text{ onde:}$$

ρ_s : Densidade do mineral pesado

ρ_L : Densidade do mineral leve

ρ_f : Densidade do fluido

ζ_D : Fatores de sedimentação dos minerais pesados

ζ_L : Fatores de sedimentação dos minerais leves

2.3 Atuações do mecanismo de separação na mesa oscilatória

As mesas concentradoras usadas atualmente são baseadas, essencialmente, na configuração desenvolvida e patenteada por Arthur Wilfley nos Estados Unidos em 1895. Elas consistem de uma superfície plana com formato romboidal ou retangular, chamada de deque (Figura 1). Esta superfície, coberta parcial ou totalmente por “retentores” é oscilada com um movimento diferencial na direção desses. Ela apresenta inclinação reguláveis que variam tipicamente de 0 a 6° em relação à horizontal na direção transversal aos rifles, com uma pequena elevação no sentido oposto ao mecanismo que gera as oscilações. Água de lavagem é distribuída ao longo de toda a mesa, na extremidade junto à alimentação, formando uma película que escoia perpendicularmente aos rifles, na direção transversal do deque (SAMPAIO ; TAVARES, 2005).

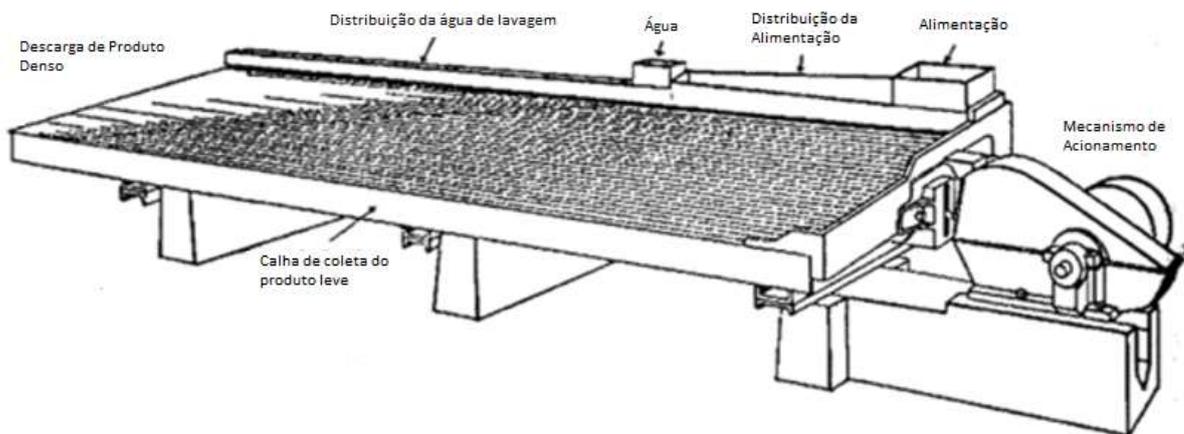


Figura 1. Mesa concentradora Wilfley (modificada de Taggart, 1945).

A água é alimentada na extremidade superior e arrasta as partículas sólidas na direção da extremidade inferior. Como nas calhas rifladas, as partículas pesadas depositam-se atrás dos rifles, enquanto as partículas leves passam sobre eles. (CHAVES, 2013).

Adicionalmente, a mesa tem um movimento oscilatório na direção perpendicular à do fluxo d'água. A velocidade de volta é maior que a de ida, de modo que as partículas retidas pelos rifles avançam sempre e são descarregadas ao fim da área riflada. (CHAVES, 2013).

O material a ser concentrado é alimentado em uma extremidade por meio de uma caixa de distribuição, e se espalha ao longo da mesa como resultado da agitação produzida pelas oscilações e pelo escoamento da água de lavagem. As oscilações são aplicadas de forma assimétrica, de modo a permitir o transporte diferencial das partículas no deque (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

As partículas que atingem a extremidade da parte coberta pelos rifles são descarregadas em uma superfície lisa, onde são submetidas à ação da partícula de água em escoamento. As partículas densas são, então, descarregadas na extremidade oposta ao mecanismo de acionamento, onde um desviador ajustável é normalmente usado para separá-las em um produto de alto teor e um misto. As partículas leves, por outro lado, são descarregadas ao longo do lado oposto da alimentação. Conforme é ilustrado na Figura 2, devido ao efeito do tamanho de partícula na separação, uma superposição significativa normalmente ocorre das bandas de concentrado e rejeito na mesa. Partículas muito finas (lamas) presentes na alimentação e mantidas em suspensão pelo fluxo de água, tendem a reportar ao extremo oposto da alimentação no deque, junto com a maior parte da água contida na polpa de alimentação e da água de lavagem (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

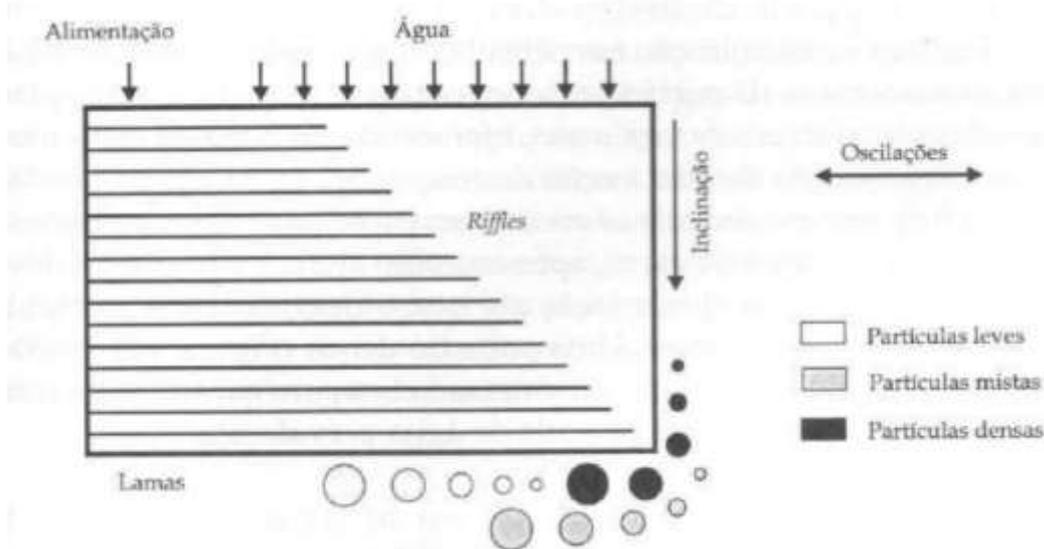


Figura 2. Arranjo típico das partículas sobre uma mesa (modificada de Burt, 1984).

Feita a descarga de minerais pesados concentrados, é nítida a distribuição das partículas no tablado num formato de leque, em faixas perfeitamente individualizadas. A partir da esquerda, na primeira faixa, os minerais pesados finos, seguindo-se os pesados mais grosseiros. Uma terceira faixa composta de um misto de minerais pesados e minerais de ganga mais pesados ou mais grosseiros; a quarta faixa composta pelos rejeitos e, finalmente um a quinta faixa de superfinos ou lamas, que pode não existir dependendo das características do minério alimentado. (CHAVES, 2013).

As oscilações são aplicadas ao longo do eixo horizontal da mesa e produzem um movimento, que parte suavemente na direção de descarga do produto denso e termina abruptamente, com o objetivo de promover o escorregamento das partículas na referida direção (Figura 3). Este caráter assimétrico das oscilações é responsável tanto pelo transporte das partículas na direção paralela aos riffles, quanto por garantir uma mobilidade adequada às partículas que compõe o leito, permitindo a deposição das mais densas até o deque (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

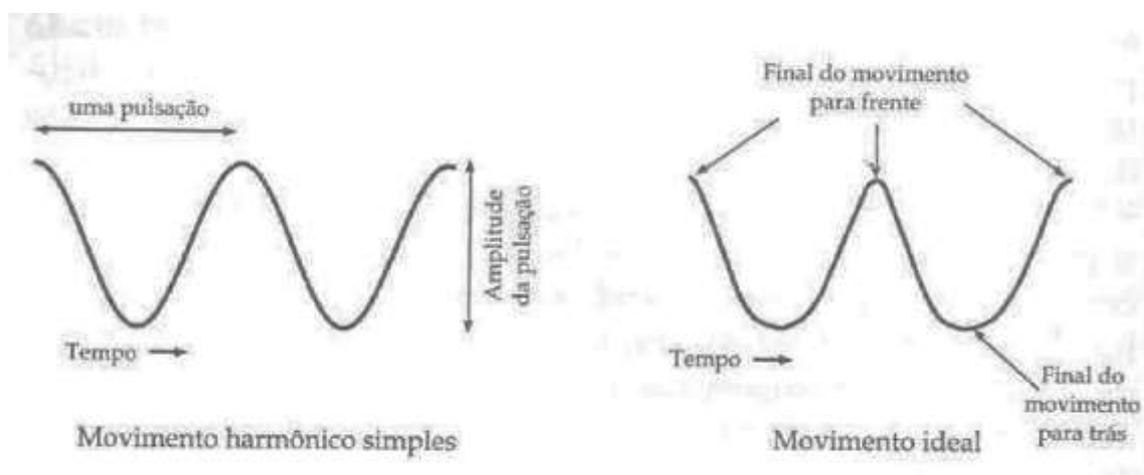


Figura 3 Movimento harmônico comparado ao movimento ideal do deque da mesa oscilatória.

Os principais mecanismos atuantes no processo de concentração gravítica, apresentados por Lins (2010) são:

- a) Aceleração diferencial: uma partícula sofre interferências das paredes do concentrador ou de outras partículas e, por tanto, pode mover-se apenas por tempo e distancia curto antes que pare, ou seja, desviada por uma superfície ou por outra partícula.
- b) Sedimentação retardada: uma partícula em queda livre em fluido (água, por exemplo) é acelerada por certo tempo pela ação da força de gravidade, aumentando sua velocidade até alcançar um valor máximo, a velocidade terminal, que então permanece constante.
- c) Velocidade diferencial em escoamento laminar: as partículas são transportadas em uma lamina de água, elas se arranjam na seguinte sequência, de cima para baixo em um plano inclinado: finas pesadas, grossas pesadas e finas leves, e grossas leves. A forma influencia este arranjo, com partículas achatadas se posicionam acima das esféricas. Nota-se que este arranjo é o inverso do que ocorre na sedimentação retardada, sugerindo que uma classificação hidráulica (que se vale do mecanismo de sedimentação) do minério a ser concentrado por velocidade diferencial é mais adequada que um peneiramento.
- d) Consolidação intersticial; este mecanismo ocorre devido à formação de interstícios entre partículas grossas de um ou mais minerais, proporcionando liberdade de movimentação das partículas finas nos vazios formados. Por exemplo, no final do impulso em um jigge, o leito começa a se compactar e as partículas pequenas podem então descer através dos interstícios sob a influência da gravidade e do fluxo de água descendente, estes provocados pela sucção que se inicia.
- e) Ação das forças cisalhantes: se uma suspensão de partículas é submetida a um cisalhamento contínuo, há uma tendência ao desenvolvimento de pressões através do plano de cisalhamento e perpendicular a este plano, podendo resultar na segregação das partículas. O efeito resultante desses esforços de cisalhamento sobre uma partícula é diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e decresce com o aumento da densidade. Deste modo, as forças de Bagnolde provocam uma estratificação vertical: partículas grossas e leves em cima, seguindo-se finas leves e grossas pesadas, com as finas pesadas próximas à superfície do plano.

Embora a concentração em película de água exija, a rigor, apenas uma monocamada de partículas sobre o deque, na prática, múltiplas camadas são alimentadas na mesa, oferecendo uma maior capacidade. A estratificação devido à ação das oscilações se dá entre os rifles (Figura 4), que geralmente se encontram posicionados paralelamente ao eixo mais longo da mesa, apresentando altura que diminui desde a extremidade da alimentação até quase desaparecer próximo à descarga do produto denso. Uma parte de deque, próxima à descarga do produto denso, é deixada lisa para garantir com que condições de separação em película de água prevaleçam (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

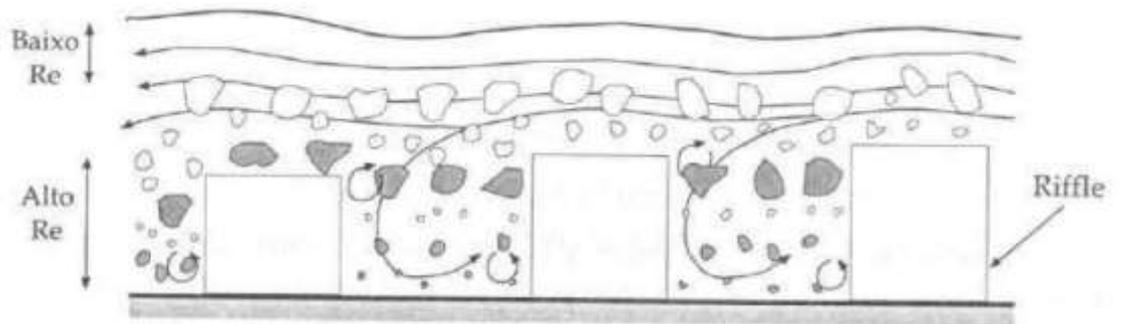


Figura 4. Estratificação entre os rifles em mesas oscilatórias.

As principais finalidades dos rifles são:

- a) Formar cavidades para a formação de leitos por ação semelhante à jigagem;
- b) Abrigar as partículas densas para transmissão das oscilações;
- c) Expor as partículas grossas e leves ao fluxo transversal de água de lavagem após a estratificação (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Apesar das desvantagens em relação ao layout e sua baixa capacidade unitária, basicamente entre 50 e 300 (kg/h)/m² (baseado nos dados apresentados por Mills, 1978), a mesa oscilatória possui o melhor desempenho metalúrgico na produção de finos, geralmente não são empregadas na concentração primária.

A vibração gerada pela mesa oscilatória dificulta sua aplicação em plantas móveis devido aos esforços horizontais transmitidos a estrutura, porém, para plantas em terra é utilizada na limpeza de concentrados.

2.4 Aplicações da Mesa Oscilatória

Aplicação da concentração densitária no processo de beneficiamento da *scheelita* (FERNANDES, 2011). O processo de beneficiamento da *scheelita* após o processo de cominuição é realizado por equipamentos de concentração gravítica explorando as características físicas do mineral, principalmente a massa específica (densidade), onde geralmente são utilizadas as mesas vibratórias e jigues, na qual a concentração inicial é realizada por jigagem onde se concentra um material com uma maior granulometria, e o rejeito do jigue alimenta as mesas gerando o concentrado final. As recuperações nas plantas chegam a atingir valores entre 60 e 70%. Em alguns casos, na concentração utiliza-se flotação aliada a métodos gravimétricos (FERNANDES, 2011).

Concentração de finos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês da Mineração Morro da Mina/RDM por mesa oscilatória. (REIS; LIMA, 2005).

A amostra de finos de manganês provenientes da lavagem do minério de manganês da Mineração Morro da Mina/RDM era constituída, essencialmente, pelos minerais de manganês rodocrosita e espessartina, quartzo, flogopita e clinocloro, huntita, anita e rutilo. Esses minerais foram

determinados por difração de raios X (método do pó total). A distribuição granulométrica foi obtida por um peneiramento a úmido, usando a série Tyler de peneiras de 0,42 a 0,037 mm (35 a 400 mesh). (REIS; LIMA, 2005).

Os teores de Mn, Fe, SiO₂, CaO, Al₂O₃ e P, da amostra global e das frações granulométricas acima de 0,074 mm (+200mesh) e abaixo de 0,074 mm (-200mesh) e dos produtos dos ensaios de concentração, foram determinados por fluorescência de raios X. (REIS; LIMA, 2005).

Para os estudos de concentração gravítica em mesa oscilatória, foi utilizada uma mesa tipo Wilfley. As variáveis estudadas foram as faixas granulométricas +0,074 mm, -0,074 mm e amostra global; ângulo de inclinação da mesa igual a 3° e 5° e a porcentagem de sólidos de 15, 20, 25, 30, 35%. As massas de amostra utilizadas para cada ensaio sempre foram de 2 kg. (REIS; LIMA, 2005).

A mudança do ângulo de inclinação da mesa de 5° para 3° acarretou um grande aumento na recuperação de manganês nos concentrados, chegando a 77%, para a amostra global, 81%, para a fração acima de 0,074 mm e 62%, para a fração abaixo de 0,074mm, ou seja, acréscimos de 20, 33 e 24%, respectivamente. (REIS; LIMA, 2005).

Em conjunto, os maiores valores da relação de enriquecimento e recuperação de manganês são obtidos para a fração granulométrica acima de 0,074 mm (recuperação de Mn de 81%) e amostra global (recuperação de Mn de 77%), nos ensaios com 15% de sólidos na polpa e a mesa com ângulo de inclinação igual a 3° (REIS; LIMA, 2005).

3 METODOLOGIA

A metodologia usada mostra a direção para a elaboração do presente estudo, com o objetivo de analisar as características e resultados do método usado. Podemos dizer que é a explicação detalhada e exata de toda a ação desenvolvida no trabalho de pesquisa.

Aqui apresentamos a metodologia do nosso trabalho assim como a classificação do mesmo quanto a alguns critérios.

Exemplificando, quanto à natureza trata-se de uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos.

Quanto à abordagem esta é uma pesquisa Quali-Quantitativa, pois tem aspectos qualitativos (buscando o porquê das coisas) e quantitativos (na comparação dos resultados).

Ainda é uma pesquisa Explicativa, quanto aos objetivos, justamente porque identifica os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência do fenômeno.

E finalizando, quanto aos procedimentos técnicos, classificamos esta como Bibliográfica, pois está fundamentada em materiais já publicados como artigos, livros e materiais disponibilizados na internet, e pode ser considerada experimental, pois, delimita-se o fenômeno, formulam-se hipóteses, determinam-se os métodos e submete-se o fenômeno à experimentação em condições de controle e com finalidade de alcançar os objetivos do estudo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta deste trabalho é realizar testes em laboratório, a fim de se obter um maior teor de minério de ferro contido nas amostras de rejeito oriundas do processo de beneficiamento da hematita compacta da Pedreira I Valemix, situada na região de Catas Altas MG. Para isso, foi necessário o cumprimento de algumas etapas, como: homogeneização e quarteamento, moagem, peneiramento, separação gravítica ou densitária e classificação. Para melhor compreensão do processo fez-se necessário, avaliar, investigar e analisar os dados coletados.

Etapa I: Pesquisa e estudo do material bibliográfico referente à concentração gravítica ou densitária do minério de ferro.

A etapa inicial envolveu a pesquisa, leitura, análise crítica e interpretação de diversos artigos e publicações, de diversas fontes, que contribuíram com diferentes informações sobre o processamento do rejeito do minério de ferro a partir dos métodos densitários.

Etapa II: Homogeneização e quarteamento

Após a seleção das amostras, deu-se início ao processo de homogeneização, que significa tornar homogênea a amostra para a realização do quarteamento (técnica usada para reduzir a massa da amostra em fração menor). O quarteamento pode ser feito por um processo manual ou mecânico, que será definido pelo tamanho e peso da amostra global. Esta etapa foi realizada manualmente com o uso da cruzeta, no laboratório da UEMG – campus de João Monlevade MG.

Etapa III: Análise Granulométrica

A análise granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como frequência com que ocorrem em uma determinada faixa de tamanho. Em tratamento de minérios, é empregada para determinação de liberação dos minerais valiosos em relação aos minerais de ganga nas varias faixas de tamanho (LIMA; LUZ, 2001)

Etapa IV: Separação gravítica ou densitária

Esta etapa possui um princípio simples, porém preciso, onde foi utilizado um líquido de densidade conhecida e controlada (neste caso a água), intermediária em relação à densidade do mineral que se deseja separar (o minério de ferro). O mineral mais leve flutua e o mais pesado afunda.

Etapa V: Análise Química dos Produtos

Nesta etapa foi feita a análise química das amostras através da via úmida.

4.1 Materiais:

a) Amostras do rejeito de minério de ferro hematítico oriundo da Pedreira I Valemix da região de Catas Altas MG.

b) Peneiras, balança de precisão e quarteador.

c) Mesa concentradora

d) Picnômetro - recipiente de aferição utilizado na medição da massa volumétrica de sólidos ou líquidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSOES

Coletou-se aproximadamente 94,74 Kg de rejeito final da usina concentradora da Mina da Pedreira Um Vale Mix e posteriormente conduzida ao laboratório de Tratamento de Minérios da UEMG, no qual se realizou os procedimentos de preparação, caracterização e concentração por método densitário da amostra. A tabela 2 apresenta a análise química do material usado para os testes densitários.

REJEITO ESTOQUE				
DATA	AMOSTRA	FAIXA	MASSA (g)	Fe
06/out	9984	-0,150 + 0,106 mm	276,800	31,85
06/out	11596	-0,150 + 0,106 mm	421,700	15,47

Tabela 2 – Análise Química da amostra (Elaborado pelas autoras)

5.1 Preparações das Amostras

A preparação das amostras finais, destinadas à caracterização e aos testes iniciou-se com a secagem da amostra e em seguida foi feita de técnicas de homogeneização em pilha alongada e cônica por pazada alternada e quarteamento, conforme mostra a figura 5, até a obtenção de alíquotas de aproximadamente 2,450 kg para caracterização granulométrica e 8,739 Kg para os ensaios de concentração.



Figura 5. Preparação da amostra. (Elaborado pelas autoras)

5.2. Caracterização das Amostras

Realizou-se análise granulométrica por meio de peneiramento a seco utilizando o padrão da série *Tyler* de peneiras, nas faixas de 14, 35, 40, 60, 100 e 140 *Mesh* (unidade de medida), com a finalidade de conhecer a distribuição da amostra por faixas, conforme figura 6.



Figura 6. Peneiramento a seco. (Elaborado pelas autoras)

Através da observação do gráfico gerado com os resultados obtidos na análise granulométrica, nota-se dentro da sua distribuição, apresentada na tabela 3, que a amostra possui um *top size* (maior tamanho de fragmento) de 1,4mm com o retido simples de 1,52% no entanto o maior valor do retido simples é de 43,14% na abertura de 0,150 mm, o que de acordo com a tabela 1 de correlação entre o critério de concentração e a granulometria de aplicabilidade da concentração gravítica, a separação será efetiva na realização dos testes na mesa concentradora sem a necessidade de realizar uma cominuição do material. Como podemos verificar na tabela 3 e no gráfico 1 abaixo:

malha taylor	abertura (mm)	massa (g)	ret. Simp. (%)	ret. Acum.(%)	%passante	massa maxima (g)	Log x	Log y
14#	1,400	34,200	1,524	1,524	98,476	0,000	0,146128	1,993329
35#	0,500	308,200	13,737	15,262	84,738	6.284,794	-0,30103	1,928079
40#	0,425	43,400	1,934	17,196	82,804	3.059,703	-0,37161	1,91805
60#	0,250	497,500	22,175	39,372	60,628	2.232,756	-0,60206	1,782677
100#	0,150	967,800	43,138	82,509	17,491	1.323,115	-0,82391	1,242803
140#	0,106	65,000	2,897	85,407	14,593	846,793	-0,97469	1,164153
-	Fundo	327,400	14,593	100,000	0,000	0,000	-	-
Total		2243,500						
massa inicial (g) 2255,1000			Perda (g)	11,6000				
			% Perda	0,51				

Tabela 3. Tabela de Peneiramento. (Elaborado pelas autoras)

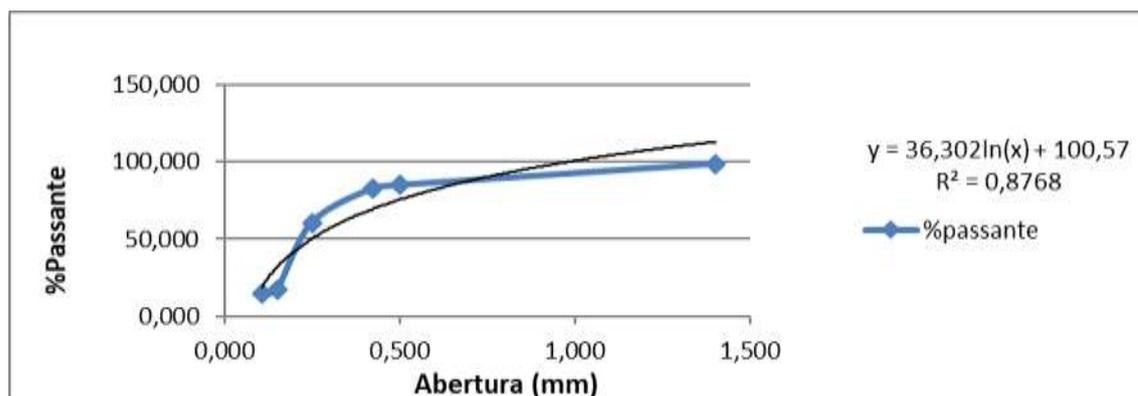


Gráfico 1. Gráfico de Peneiramento (Elaborado pelas autoras)

5.3. Ensaios de Concentração Densitária

O equipamento utilizado nos testes de concentração densitária foi a mesa oscilatória (figura 7), objetivando a recuperação de minerais de ferro existentes no rejeito da usina da pedra Um Vale Mix, podendo assim estabelecer uma estimativa da recuperação metalúrgica através da fórmula:

$$R = \frac{c \cdot (a - e)}{a \cdot (c - e)} * 100, \text{ onde:}$$

R: Recuperação Metalúrgica

c: Teor do Concentrado

a: Teor da Alimentação

e: Teor do Rejeito



Figura 7. Teste de concentração densitária na mesa oscilatória (Elaborado pelas autoras)

No primeiro teste algumas variáveis foram mantidas durante sua realização, a vazão da água de 117,6 L/h e a frequência do equipamento 1200Hz , variando apenas a vazão de sólidos, sendo elas, 2,64Kg/h; 3,77 Kg/h; 4,16 Kg/h; 4,12 Kg/h e 5,23 Kg/h, como mostra a tabela a seguir.

TESTE 1								
amostras	vazão de sólidos (Kg/h)	vazão da água (L/h)	alimentação (kg)	concentrado (kg)	rejeito (kg)	Recuperação em massa (%)	Perda em Massa (%)	Rec. Metalúrgica (%)
1A	2,64	117,6	0,9376	0,5028	0,4348	53,6263	46,3737	81,83368994
1B	3,77	117,6	0,6713	0,3989	0,2724	59,4220	40,5780	78,40007341
1C	4,16	117,6	0,7729	0,3540	0,4189	45,8015	54,1985	56,21946725
1D	4,12	117,6	0,9713	0,4146	0,5567	42,6851	57,3149	55,04286659
1E	5,23	117,6	0,9584	0,4143	0,5441	43,2283	56,7717	73,52677743

Tabela 4 – Resultados do teste 1 realizado na mesa oscilatória (Elaborado pelas autoras)

No segundo teste foi mantida a frequência do equipamento de 1220 Hz e a vazão do sólido em 2,64 Kg/h, que foi definida através da realização de uma estimativa do melhor resultado de recuperação metalúrgica por meio de testes de densidade do sólido de cada amostra, apresentada no apêndice A, variando a vazão da água, sendo elas, 132,01 L/h, 144,00 L/h, 180,00 L/h, 204,01 L/h, 119,98 L/h, 155,98 L/h e 100,80 L/h, como mostra a tabela 5.

TESTE 2								
amostras	vazão de sólidos (Kg/h)	vazão da água (L/h)	alimentação (kg)	concentrado (kg)	rejeito (kg)	Recuperação em massa (%)	Perda em Massa (%)	Rec. Metalúrgica (%)
2A	2,64	132,01	0,5892	0,2224	0,3668	37,7461	62,2539	44,52147785
2B	2,64	144,00	0,8059	0,2922	0,5137	36,2576	63,7424	46,88153487
2C	2,64	180,00	0,7773	0,3076	0,4697	39,5729	60,4271	52,21086177
2D	2,64	204,01	0,5878	0,2025	0,3853	34,4505	65,5495	46,37677799
2E	2,64	119,98	0,5105	0,2176	0,2929	42,6249	57,3751	53,94321454
2F	2,64	155,98	0,6533	0,2425	0,4108	37,1192	62,8808	47,34663939
2G	2,64	100,80	0,5040	0,205	0,299	40,6746	59,3254	52,59832456

Tabela 5 – Resultados do teste 2 realizado na mesa oscilatória (Elaborado pelas autoras)

No teste 2 também foi realizada a estimativa do melhor resultado de recuperação metalúrgica por meio de testes de densidade do sólido de cada amostra, como mostra o apêndice B e foi observada que a amostra 2E obteve a melhor resultado.

Após a definição dos melhores resultados obtidos nos testes 1 e 2, colheu-se uma alíquota de cada amostra para realização da análise química das mesmas, apresentando os seguintes resultados.

AMOSTRA 1A - TESTE 1 CONCENTRADO		AMOSTRA 2E - TESTE 2 CONCENTRADO	
TEOR DE Fe %	53,4	TEOR DE Fe %	48,53
REJEITO		REJEITO	
TEOR DE Fe %	8,79	TEOR DE Fe %	12,37

Tabela 6 – Resultados da Análise Química (Elaborado pelas autoras)

Comparando assim todos os resultados notamos que tanto no teste 1 quanto no teste 2 obteve-se a melhor recuperação metálica com vazões de água com valores próximos, confirmando assim que a vazão da água em 117,6 L/h e a vazão de sólidos em 2,64 Kg/h é a melhor combinação.

Entretanto, este resultado poderá ser enriquecido através da realização de um *recliner*, utilizando a melhor combinação da vazão de água e sólido, que atingimos no teste anterior.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do trabalho realizado, foi possível constatar a viabilidade do uso do método densitário com a utilização da mesa concentradora para o tratamento do rejeito da Pedreira Um Vale Mix. Observando o resultado dos dois testes, nota-se que mantendo a frequência da mesa em 1200hz, a vazão da água em 117,6 L/h e a vazão de sólidos em 2,64 Kg/h foi possível uma recuperação metálica de 81,8% com teor de ferro igual 53,4%.

Outro ganho considerável foi na redução do teor de ferro no rejeito final, este tinha uma media de 23,66%, caindo para 8,79%, objetivando assim o aumento da vida útil das pilhas de rejeito e contribuindo para a manutenção de reserva de um bem não renovável. Além de incentivar a aplicação deste método em plantas piloto.

8. REFERENCIAS

BARCELOS, Hemerson Olímpio. **Jigagem de Minérios Itabiríticos**. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2468/1/DISSERTAÇÃO_JigagemMinériosItabiríticos.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Beneficiamento de Minérios**. Brasília - DF Disponível em: <http://www.redeaplmineral.org.br/pormin/noticias/legislacao/beneficiamento_de_minerio.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2017.

CHAVES, Arthur Pinto; CHAVES FILHO, Rotênio Castelo. **Separação densitária: Separação densitária e a separação do meio denso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

FERNANDES, Bruno Rodrigo Borges. **Aproveitamento dos finos de scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida: Beneficiamento de scheelita**. 2011. 75 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

HENRIQUES, Andreia Bicalho et al. Caracterização mineralógica de hematitas do Quadrilátero Ferrífero. **Pensar Engenharia**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, abr. 2013. Semestral. Disponível em: <http://revistapensar.com.br/engenharia/pasta_upload/artigos/a104.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2017.

HOLMES, Oliver Wendell. **The Autocrat of the Breakfast-Table**. Phillips, Sampson and Company. 1858.

KAWA, Luciane. **Química, Meio Ambiente e Edificações: O Minério de Ferro e os Rejeitos das Minas**. 2015. Disponível em: <<http://professoralucianekawa.blogspot.com.br/2015/11/o-minerio-de-ferro-e-os-rejeitos-das.html>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

LIMA, Rosa Malena Fernandes; LUZ, José Aurélio Medeiros da. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s.l.], v. 54, n. 2, jun. 2001. FapUNIFESP (SciELO).

LINS, Fernando Antonio Freitas et al. Concentração Gravítica. In: LUZ, Adão Benvindo da et al. **CETEM Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2010.

LOPES, Marcos. **Homogeneização e quarteamento na mineração**. 2014. Disponível em: <<http://tecnicoemineracao.com.br/homogeneizacao-e-quarteamento-na-mineracao/>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

MORAIS, Carlos Antônio de et al. Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 8, n. 36, maio 2014. Mensal. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/04-CTN2.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann et al. Concentração em mesas e outros equipamentos oscilatórios. In: _____ et al. **Beneficiamento Gravimétrico**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2005. Cap. 9.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann et al. Projetos de Circuitos e Seleção de Equipamentos. In: _____ et al. **Beneficiamento Gravimétrico**. Rio Grande do Sul: Ufrgs, 2005. Cap. 3.

SAMPAIO, João Alves et al. Almeida ,Salvador Luiz Matos de: Silva , Antonio Odilon da. In: _____ et al. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais - CETEM/MCT: Ensaios em mesas Oscilatórias**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007. Cap. 14.

SILVA, André Carlos. **Concentração física de minerais**: Catalão, 2012. 191 slides, color. Disponível em: <https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/cfm_03.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2017.

SINFERBASE (Brasilia). **Relatório Abril 2017**. 2017. Acesso em: 01 jun. 2017.

REIS, Érica Linhares; LIMA, Rosa Malena Fernandes. Concentração de finos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês da Mineração Morro da Mina/RDM por mesa oscilatória. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s.l.], v. 58, n. 3, set. 2005. FapUNIFESP (SciELO).