



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



RODRIGO COTTA MOREIRA

**DESAGREGAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DE
UMA MINERADORA DA REGIÃO DA SERRA DO ITATIAIUÇU – MG**

OURO PRETO

2018

RODRIGO COTTA MOREIRA

**DESAGREGAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DE
UMA MINERADORA DA REGIÃO DA SERRA DO ITATIAIUÇU – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para graduação em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis.

OURO PRETO

2018

M838d Moreira, Rodrigo Cotta.
Desagregação de rejeito de minério de ferro proveniente de uma mineradora da região da Serra do Itatiaiuçu - MG [manuscrito] / Rodrigo Cotta Moreira. - 2018.

34ff.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Engenharia de minas. 2. beneficiamento de minério. 3. Minério de ferro. 4. Resíduos. I. Reis, Érica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.752

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 17 dias do mês de julho de 2018, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**DESAGREGAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DE UMA MINERADORA DA REGIÃO DA SERRA DO ITATIAUÇU - MG**”, pelo aluno **Rodrigo Cotta Moreira**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr.^a Érica Linhares Reis (orientadora)**, **M.Sc. Geriane Macedo Rocha** e **M.Sc. Aline da Mata Chiacchio Leite**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **aprovação** do candidato, com a nota **8,5**... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

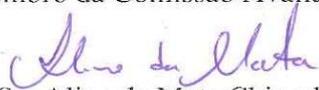
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 17 de julho de 2018.


Prof. Dr.^a Érica Linhares Reis
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora


M.Sc. Geriane Macedo Rocha
Membro da Comissão Avaliadora


M.Sc. Aline da Mata Chiacchio Leite
Membro da Comissão Avaliadora


Rodrigo Cotta Moreira


Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

A Deus, familiares e amigos,
em especial à memória do saudoso
companheiro Reinaldo Sabino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por estar comigo em todos os momentos e por todas as bênçãos alcançadas.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e incentivo a esta conquista. Aos meus irmãos, por serem meus maiores exemplos de caráter e determinação. À Duda, pelo carinho e paciência nesses anos dedicados aos estudos.

Aos professores da Escola de Minas por terem me proporcionado um crescimento profissional e pessoal ímpar. Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas, em especial à Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis, pela orientação, pelos ensinamentos repassados e pela oportunidade de realizar o presente trabalho.

Aos amigos de curso, em especial à Bárbara Dornelas, pela grande ajuda na realização dos experimentos e pela parceria durante a Iniciação Científica.

Por fim, agradeço imensamente à República Quinta Negra, local onde passei momentos incríveis, evoluí muito como pessoa e fui apresentado a grandes amigos dos quais jamais irei me esquecer.

RESUMO

Neste trabalho foram realizados estudos de caracterização e desagregação de um rejeito gerado no beneficiamento de minérios de ferro em usinas que não possuíam tecnologia capaz de concentrá-los, e desta forma, foram depositados em uma barragem de rejeitos de finos naturais. Pensando que o aproveitamento deste passivo ambiental é de grande importância, a caracterização tecnológica do rejeito pode possibilitar o processamento dessa antiga barragem. Na caracterização foram realizadas análises granulométricas, análises químicas, e mineralógicas, e ainda, análises para determinação da densidade, superfície específica e porosidade. Em seguida, foi realizada a identificação de técnicas de escrubagem com a finalidade de desagregar os materiais consolidados para posteriores ensaios de deslamagem e concentração. Os ensaios de escrubagem foram primeiramente realizados em uma célula de flotação, variando-se parâmetros como o tempo de desagregação e a rotação da hélice. Posteriormente utilizou-se a carcaça de um moinho, variando-se o seu grau de enchimento, sua velocidade de rotação, e o tempo de operação, avaliando quais combinações proporcionariam melhores resultados. A porcentagem passante do material em uma peneira de 6,35 mm, que sem as técnicas de desagregação era igual a 81,30%, sofreu um aumento considerável, atingindo o melhor resultado na célula de flotação igual a 96,30% e no moinho igual a 91,85%.

Palavras-chave: caracterização; desagregação; rejeito.

ABSTRACT

In this work, characterization and disaggregation studies of a tailing were carried out, which was generated from the beneficiation of iron ore in plants that did not have the technology for its processing and were therefore deposited in a natural tailings dam. Considering that the use of this environmental liability is of great importance, the technological characterization of the waste can in the future make possible new projects, thus enabling the processing of this old dam. For the characterization, granulometric analyzes, chemical and mineralogical analyzes were carried out, as well as analyzes for determination of density, specific surface and porosity. Subsequently, the identification of scrubbing techniques was carried out with the purpose of disaggregating the consolidated materials for further delamination and concentration tests. The scrubbing assays were first carried out in a flotation cell, varying parameters such as the break-up time and the rotation of the propeller. Afterwards, the casing of a mill was used, varying its degree of filling, its speed of rotation and the time of operation, evaluating which combinations would give better results. The percentage of passing material in a 6.35 mm sieve, which without the disaggregation techniques was equal to 81.30%, increased considerably, reaching the best result in the flotation cell of 96.30% and in the casing of the mill equal to 91.85%.

Keywords: characterization; disaggregation; tailings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Fluxograma típico de tratamento de minério de ferro.....	13
Figura 3.2: Serra do Itatiaiuçu e Serra do Curral – Quadrilátero Ferrífero.....	15
Figura 3.3: Municípios integrantes da Serra do Itatiaiuçu.....	16
Figura 3.4: Tambor desagregador rotativo.....	18
Figura 3.5: Célula Denver de atrição.....	18
Figura 4.1: Carcaça de moinho tubular e célula de flotação, respectivamente. Equipamentos estes utilizados nos ensaios de desagregação em escala de laboratório.....	23
Figura 4.2: Mangueira para simulação de spray.....	24
Figura 5.1: Curva da análise granulométrica do rejeito da barragem de uma mineradora de ferro localizada na região da Serra do Itatiaiuçu – MG.....	26
Figura 5.2: Efeito da velocidade e do tempo na desagregação em célula de flotação.....	27
Figura 5.3: Combinações entre as variáveis utilizadas nos ensaios na carcaça do moinho e seus resultados.....	28
Figura 5.4: Efeito do grau de enchimento na desagregação em moinho para tempos de 2 e 5 minutos.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Fórmula química e conteúdo teórico de ferro dos principais minerais portadores de ferro.....	12
Tabela 4.1: Variáveis operacionais analisadas na célula de flotação e seus respectivos níveis...24	24
Tabela 4.2: Condição de realização dos ensaios de desagregação na célula de flotação.....25	25
Tabela 4.3: Variáveis operacionais analisadas no moinho e seus respectivos níveis.....25	25
Tabela 4.4: Condição de realização dos ensaios de desagregação no tambor.....25	25
Tabela 5.1: Teores dos elementos majoritários presentes na amostra.....26	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo Geral	10
2.2. Objetivos Específicos	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. Minério de ferro – Aspectos gerais	11
3.2. Beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos	13
3.3. Depósito e mineralogia da Serra do Itatiaiuçu	15
3.4. Desagregação/Escurbagem de Minérios	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1. Análise granulométrica do rejeito	21
4.2. Análise mineralógica	21
4.3. Análise química	21
4.4. Análise de densidade estrutural	22
4.5. Análise de área superficial e volume de microporos	22
4.6. Ensaio de desagregação	22
4.6.1. Equipamentos	22
4.6.2. Teste preliminar	23
4.6.3. Ensaio de desagregação utilizando a célula de flotação	24
4.6.4. Ensaio de desagregação utilizando a carcaça do moinho tubular	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1. Caracterização do rejeito de minério de ferro em estudo	26
5.2. Ensaio de desagregação	27
6. CONCLUSÕES	30
7. REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui papel de destaque na produção de minério de ferro, alcançando 400 milhões de toneladas no ano de 2014, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2015). O estado de Minas Gerais é o maior produtor entre os estados brasileiros e possui grandes reservas, principalmente no Quadrilátero Ferrífero (JESUS, 2015).

Visando suprir à demanda do mercado mundial, aliado ao crescente desenvolvimento das nações, se torna cada vez mais importante o aumento da produção de minério de ferro de forma sustentável. Para isso, as empresas mineradoras necessitam de um aperfeiçoamento constante dos processos de concentração e o desenvolvimento de pesquisas destinadas ao melhor aproveitamento das reservas. Dessa forma, além de aumentar a produção desse bem mineral, o melhor aproveitamento também minimizaria os impactos causados ao meio ambiente, gerando menor quantidade de resíduos provenientes da mineração e prolongando a vida útil das jazidas minerais, que são recursos não renováveis.

O rejeito de minério de ferro em estudo está depositado em uma barragem, que tem hoje cerca de 14,21 milhões de toneladas depositadas. O material depositado nessa barragem é constituído, em sua grande parte, pelos finos naturais do processo produtivo de granulados e *sinter feed* (jigagem, espirais, tambor magnético). A partir de 2010, os finos passaram a alimentar um concentrador magnético de alta intensidade, levando também à produção de *pellet feed*, e o material disposto na barragem passou a ser o rejeito da concentração magnética. A deposição nessa barragem se encerrou no primeiro semestre de 2015. Portanto, será de grande importância do ponto de vista ambiental e econômico o estudo destes rejeitos, identificando potenciais formas de beneficiamento dos mesmos, o que levará à diminuição destes depósitos de resíduos, que constituem passivos ambientais desta mineradora.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Caracterizar e realizar testes de desagregação de um resíduo proveniente da barragem de rejeitos de uma mineradora de minério de ferro da região da Serra do Itatiaiuçu – MG (Quadrilátero Ferrífero).

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física, química e mineralógica do rejeito a fim de se obter maiores conhecimentos a respeito do material e conseqüentemente, facilitar o planejamento dos ensaios posteriores;
- Realizar ensaios com o rejeito em questão, analisando-se a sua resistência à desagregação;
- Determinar a combinação de variáveis, assim como o equipamento, que fornece o maior índice de desagregação do material analisado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Minério de ferro – Aspectos gerais

O minério de ferro é um agregado mineral a partir do qual é possível extrair o ferro (Fe), matéria prima essencial na siderurgia para produção do aço. Em virtude de suas propriedades químicas e físicas o minério de ferro é, na sua quase totalidade, utilizado na indústria siderúrgica (QUARESMA, 2001).

O ferro é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, onde tem participação em 4,5% em massa, sendo superado apenas pelo oxigênio, o silício e o alumínio. Industrialmente, a única forma de obtê-lo é a partir de substâncias minerais. Embora inúmeros minerais o contenha em sua composição, apenas alguns podem ser economicamente explorados para a obtenção do ferro, quer pela quantidade desse elemento nos minerais, quer pela sua concentração ou distribuição nas rochas que constituem os corpos de minério (CARVALHO, 2013).

A utilização do ferro como substituto do bronze na fabricação de armas, ferramentas e outros utensílios, no período conhecido como Idade do Ferro, apresentou um grande avanço tecnológico na história da humanidade. Atualmente, é muito difícil imaginar a vida humana sem o ferro, levando em conta que o elemento é a principal matéria prima do aço, que além de ser muito utilizado na construção civil, na indústria automobilística e na confecção de máquinas e ferramentas, apresenta inúmeras outras finalidades.

Os minérios de ferro classificam-se em óxidos, carbonatos e silicatos, e essa classificação é feita de acordo com a composição química do mineral fornecedor do elemento metálico. Os principais minerais que contêm ferro são: magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) e siderita (FeCO_3). A fórmula química e o conteúdo teórico de ferro dos principais minerais portadores estão representados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Fórmula química e conteúdo teórico de ferro dos principais minerais portadores de ferro

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro (%)
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$	62,9
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-3H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	FeTiO_3	36,8
Siderita	FeCO_3	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2013

As formações ferríferas bandadas (FFB) compreendem as maiores reservas de ferro do mundo, com teores médios do metal entre 20% e 55%. Elas são formadas por rochas finamente bandadas ou laminadas e constituem-se, principalmente, de minerais de sílica e de ferro, originados provavelmente por precipitação química. Posteriormente, essas rochas foram modificadas por diagênese e metamorfismo, que as tornaram ainda mais ricas em ferro (CARVALHO, 2013).

Após o beneficiamento, o minério bruto (ROM) gera produtos classificados como granulados (acima de 6,3 mm) e finos (*sinter feed* – entre 0,15 e 6,3 mm e *pellet feed* – abaixo de 0,15 mm). Enquanto os granulados são utilizados diretamente nos altos fornos os finos passam por processos de aglomeração (sinterização e pelotização), para mais tarde serem adicionados nos fornos de redução (JESUS, 2009).

De acordo com o U.S. Geological Survey e a UNCTAD (Conferência da Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento), em 2011, a produção de minério de ferro do Brasil (390 milhões de toneladas) só foi superada pela produção da China (1,33 bilhão de toneladas) e da Austrália (480 milhões de toneladas). Entretanto, quando se leva em conta o teor médio do minério de ferro chinês, a produção do país pode ser considerada de 380 milhões de toneladas (IBRAM, 2012).

3.2. Beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos

O beneficiamento ou tratamento mineral consiste de operações pelas quais o minério deve passar após sua lavra para que suas características se adequem às necessidades do mercado consumidor. Essas operações visam modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem que haja modificações nas identidades químicas e físicas dos minerais.

Segundo Luz (2010), as operações unitárias em que o minério é submetido durante o seu beneficiamento são: operações de cominuição (redução de tamanho realizada pela britagem e/ou moagem), peneiramento e classificação (separação por tamanhos), concentração, desaguamento, secagem e disposição de rejeito. O sequenciamento das operações pode ser observado na Figura 3.1, que apresenta um fluxograma típico do beneficiamento de minério de ferro.

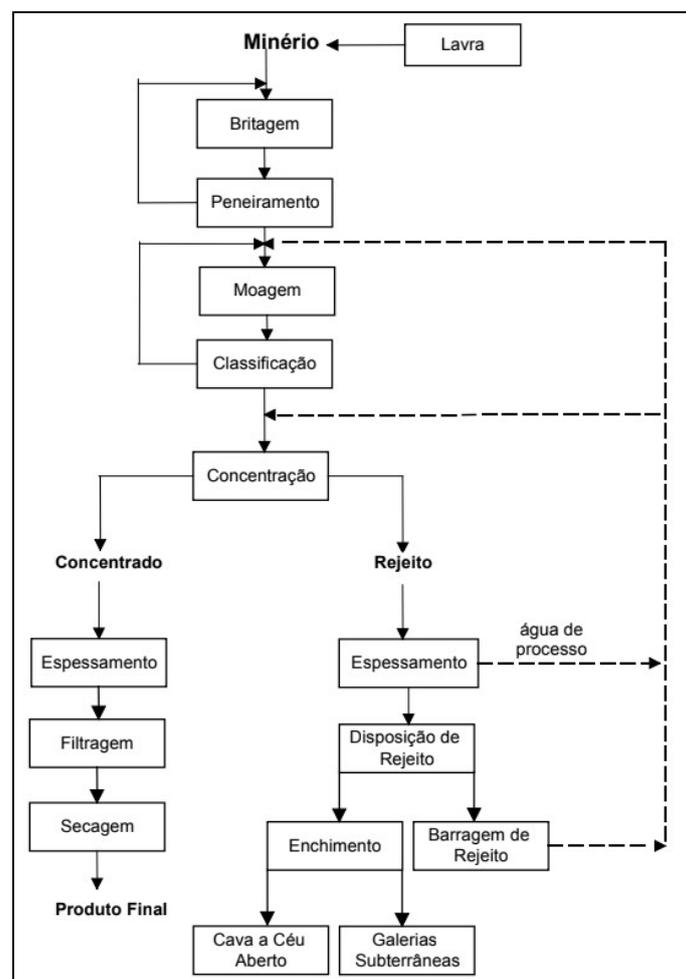


Figura 3.1: Fluxograma típico de tratamento de minério de ferro. Fonte: LUZ, 2010.

Na geração de resíduos da mineração, destaca-se a existência dos resíduos sólidos de extração (estéril) e beneficiamento (rejeitos). A polpa, composta por resíduos e água, é na maioria das vezes, depositada em barragens de rejeito. Elas são formadas a partir de um barramento maciço que pode ser feito de solo compacto, blocos de rocha ou rejeitos e devem possuir mecanismos de impermeabilização e drenagem (VALE, 2016).

No cenário atual da mineração, em que já não se encontra reservas de alto teor, a quantidade de rejeitos tende a crescer. No caso do minério de ferro, por exemplo, para cada tonelada processada têm-se 0,4 toneladas de rejeitos (IPT, 2016). Segundo Moraes (2016), o aproveitamento desses rejeitos, constituídos por partículas finas e ultrafinas, como minério de baixo teor, reduziria consideravelmente a quantidade de material descartado em barragens e, conseqüentemente, as preocupações e dificuldades de manutenção e estabilidade das mesmas.

A Universidade Federal de Ouro Preto juntamente com a iniciativa privada, vem realizando pesquisas para a utilização de rejeito da extração do minério de ferro para a fabricação de insumos para a construção civil. Esse rejeito pode ser utilizado na fabricação de diversos tipos de produtos, como blocos de pavimentação e blocos de alvenaria ou ainda como argamassa (IBRAM, 2016).

Acredita-se que a alta concentração de óxidos de ferro seja uma realidade em muitas barragens de rejeito da mineração de ferro encerradas no Brasil, principalmente no Quadrilátero Ferrífero, onde grande quantidade de minérios com altos teores de ferro já foram extraídos e beneficiados por processos ineficientes (ANDRADE, 2014).

Gomes *et al.* (2011), caracterizando os finos de uma barragem de rejeito da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero, encontrou teores médios de 48,08% de Fe_2O_3 , 20,58% de SiO_2 e 3,16% de Al_2O_3 . Após submeter o material à concentração por separação magnética, obteve-se um concentrado com 67,54% de Fe, 1,50% de SiO_2 e 0,49% de Al_2O_3 , atendendo a especificação do produto comercializado pela empresa. Em um futuro próximo, os teores encontrados na barragem podem tornar viável a recuperação desse material ferroso, tendo em vista o seu retorno ao processo produtivo.

3.3. Depósito e mineralogia da Serra do Itatiaiuçu

A Serra do Itatiaiuçu, também conhecida como Serra Azul ou Serra de Igarapé encontra-se inserida na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero, que corresponde ao prolongamento da Serra do Curral, a partir da conexão com o Sinclinal Moeda (DORR, 1969, *apud* FEAM, 2012) (Figura 3.2). Trata-se de uma notável saliência topográfica orientada na direção geral sudoeste-noroeste que se leva a uma altitude de até 1350 m, registrada no Pico do Itatiaiuçu.

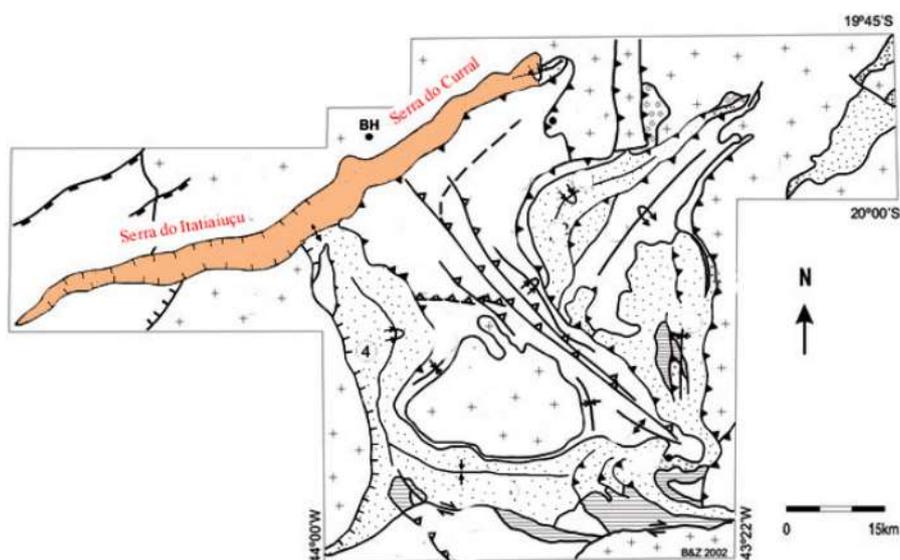


Figura 3.2: Serra do Itatiaiuçu e Serra do Curral – Quadrilátero Ferrífero. Fonte: CPRM, 2010 *apud* FEAM, 2012.

Sobre a sua localização em relação ao Estado de Minas Gerais, a Serra do Itatiaiuçu abrange os municípios de Brumadinho, Itatiaiuçu, Itaúna, Mateus Leme, Igarapé e São Joaquim de Bicas, como representado na Figura 3.3.



Figura 3.3: Municípios integrantes da Serra do Itatiaiuçu. Fonte: YKS Serviços Ltda, 2010 *apud* FEAM, 2012.

Segundo a FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente), dentre as reservas do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, a da Serra do Itatiaiuçu é uma das menores. Este pode ter sido um dos fatores responsáveis por atrair o foco das grandes mineradoras para outras regiões do Quadrilátero, como no caso de Itabira.

Na década de 1920, o governo lançou incentivos para a indústria siderúrgica nacional. No ano de 1940, os direitos das minas de Itabira foram transferidos para o governo brasileiro e em 1942 foi fundada a Companhia Vale do Rio Doce. Anos depois, durante a década de 1960, o setor mineral brasileiro foi aberto ao capital estrangeiro, contexto onde surgiram grandes empresas como a MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.), Samitri (S/A Mineração Trindade), Ferteco (Ferteco Mineração S.A.), Alcoa, CBMM e Usiminas, além de outras que também focaram em diferentes regiões (ALVES, 2008).

Esta conjuntura, associada ao surto de desenvolvimento do setor de ferro gusa, acabou possibilitando a incorporação de fundições na região de Sete Lagoas, Itaúna, Divinópolis e Cláudio. Desse modo, a atividade minerária na Serra do Itatiaiuçu iniciou-se na década de 1940 por pequenos e médios empreendedores, com o objetivo de fornecer minério de ferro para o setor de ferro-gusa instalado nestes municípios (FEAM, 2012).

Durante anos, as empresas mineradoras que atuavam na região eram de pequeno ou médio porte. No entanto, a alta valorização do minério de ferro ocorrida entre os anos 2000 e 2002 e o posicionamento junto à malha ferroviária regional, colocaram a Serra do Itatiaiuçu novamente em evidência, onde foi vista como recurso econômico de elevada lucratividade para a demanda nacional e internacional (FEAM, 2012).

3.4. Desagregação/Escrubagem de Minérios

Segundo Taggart (1945) a operação unitária de escrubagem é a desagregação de grãos unidos por material argiloso, pela ação de forças relativamente fracas. Tais forças podem ser comparadas com os esforços usuais em cominuição e devem ser suficientes para reduzir materiais razoavelmente tenros e inconsolidados. Também devem ser capazes de separar grãos unidos entre si por ligações brandas.

A utilização de equipamentos de escrubagem e lavagem em plantas de beneficiamento é motivada pela remoção de partículas finas que se encontram aderidas às partículas minerais de maior tamanho e que, normalmente, são consideradas uma fração indesejável que pode vir a diminuir o valor agregado do produto final (VARELA, 2009 *apud* COSTA & JÚNIOR, 2012).

Existem alguns tipos de equipamentos que possuem a finalidade de remover argilominerais do minério, e a escolha do equipamento ideal para desempenhar essa função depende das propriedades do material a ser desagregado. O equipamento empregado na realização da escrubagem é conhecido como *scrubber*, e este possui algumas variações. Os tambores desagregadores e as células de atrição são as variações mais comuns para realização da escrubagem. No Brasil, podemos perceber algumas propostas ou aplicações de *scrubbers* no beneficiamento mineral da areia, fosfato, zircão e hematita/goethita (FORTES, 2012).

O tambor desagregador, ou *drum scrubber*, consiste de um cilindro, aberto nas extremidades e ligeiramente inclinado em relação à horizontal, que gira em torno de seu próprio eixo, montado sobre rolos (COSTA & JÚNIOR, 2012), conforme a Figura 3.4. Já as células de atrição (Figura 3.5) consistem de agitadores com dois ou três hélices por

eixo, com sentidos alternados, fazendo com que a polpa movida por uma hélice tenha sentido oposto ao do fluxo movido por outra, de modo que os fluxos se chocam, provocando a atrição necessária de superfície de grão contra superfície de grão (LUZ *et al.* 2010).



Figura 3.4: Tambor desagregador rotativo. Fonte: Engendrar Engenheiros Associados, 2009 *apud* COSTA, 2010.

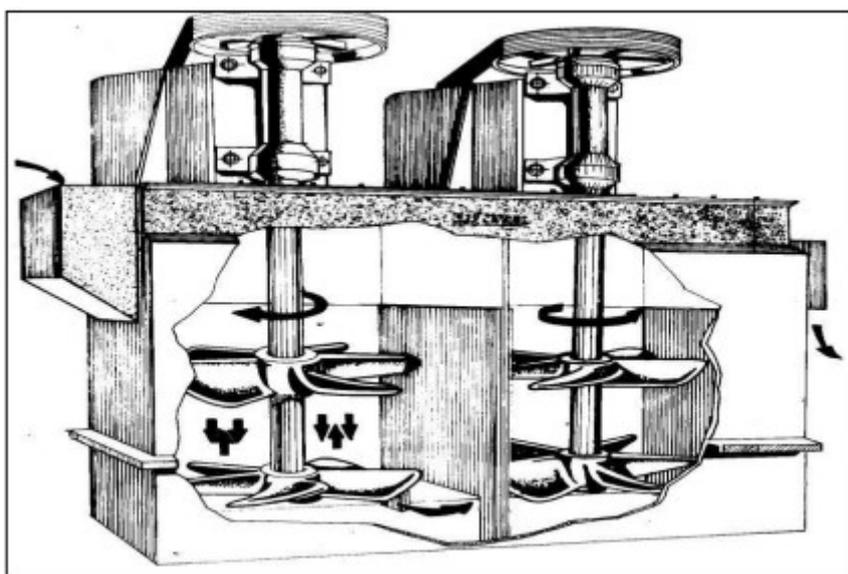


Figura 3.5: Célula Denver de atrição. Fonte: LUZ *et al.*, 2010.

Costa e Júnior (2012), investigaram a influência de variáveis operacionais na geração de finos durante o processo de escrubagem, em um tambor desagregador de laboratório, da bauxita proveniente da jazida Miltônia 3 da Mina de Bauxita de Paragominas – PA e, a partir dos dados, desenvolveram um modelo matemático empírico capaz de prever o desempenho da escrubagem em uma unidade-piloto. Das variáveis operacionais em estudo (grau de enchimento, tempo de residência da polpa e velocidade de rotação), o grau de enchimento foi o que produziu efeito estaticamente mais significativo na desagregação da bauxita. A variável resposta do modelo desenvolvido foi a quantidade de finos no produto desagregado, sendo que tal quantidade foi relacionada com o grau de enchimento e com o tempo de residência da polpa. O modelo foi validado comparando-se seus valores previstos com aqueles obtidos em ensaios de escrubagem, em uma unidade-piloto.

A escrubagem foi utilizada também em um estudo realizado por Sabedot e Sampaio (2002), para resolver o problema da presença de minerais contaminantes junto ao pré-concentrado de zircão (PCZ). A remoção da massa de minerais contaminantes presentes no PCZ foi efetuada por processos eletrostáticos e magnéticos, porém parte desses contaminantes estava envolvida por uma película argilo-ferruginosa que interfere na sua remoção durante os processos citados, dando origem a um tipo de produto final de zircão considerado de baixa qualidade. Assim, o PCZ foi submetido a ensaios de atrição semipiloto em uma célula de atrição estruturada com quatro aletas e com duas hélices ligadas ao eixo, para eliminar o problema da argila e tornar a remoção dos contaminantes (TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 e Al_2O_3) mais eficaz durante os processos. A viabilidade técnica do processo foi verificada e confirmada através dos ensaios de atrição semipiloto.

Queiroz (2003) observou os efeitos da utilização da escrubagem anterior à deslamagem sob alguns aspectos, como a remoção de lamas, a eficiência na flotação e a qualidade final do *pellet feed* produzido. No ensaio de escrubagem, realizado em escala de bancada, foi utilizada uma célula de atrição compreendendo uma cuba com quatro aletas para a intensificação da agitação, gerados por duas hélices invertidas acopladas em um eixo. A remoção de lamas, possibilitada pela escrubagem, aumentou a eficiência da flotação e, conseqüentemente, a qualidade do produto final.

Fortes (2012), estudou a possibilidade de aumento da recuperação metalúrgica na flotação reversa de um minério de ferro hematítico com a adoção da escrubagem da polpa de alimentação, seguida de deslamagem em meio disperso. Os testes foram realizados em escala de bancada em uma máquina de atrição e mostraram um aumento significativo da recuperação metalúrgica quando a escrubagem foi realizada anteriormente à flotação. A recuperação metalúrgica no processo de flotação, que sem o emprego da escrubagem era de 75,8%, chegou a 94,4% com o emprego da técnica.

Como nos exemplos citados acima, a escrubagem é sugerida ou aplicada para limpar a superfície do material. Nestes casos, a finalidade era facilitar a concentração mineral, aumentando a qualidade do produto final. É importante atentar para o fato de que a eficiência das técnicas de escrubagem dependem do bom controle das variáveis operacionais do processo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de rejeito de minério de ferro utilizadas ao longo do estudo foram provenientes de uma mineradora localizada na região da Serra do Itatiaiuçu, no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

4.1. Análise granulométrica do rejeito

A análise granulométrica do rejeito foi realizada por peneiramento a úmido. Antes de ser submetido ao peneiramento, o material foi todo desagregado manualmente. As malhas utilizadas foram de 6300 μm , 1680 μm , 1000 μm , 500 μm , 212 μm , 150 μm , 75 μm , 63 μm , 53 μm , 45 μm e 38 μm .

4.2. Análise mineralógica

Uma amostra do material foi homogeneizada e pulverizada antes de ser caracterizada por difratometria de raios-x, onde a composição mineralógica pôde ser identificada pelo método do pó total. O equipamento utilizado foi um difratômetro da marca PanAnalytical modelo Empyrean localizado no Laboratório de Difração de Raios X do DEGEO/UFOP.

4.3. Análise química

Para determinação dos elementos majoritários que constituem a amostra global do rejeito, uma amostra foi homogeneizada e pulverizada, sendo a seguir encaminhada a empresa a qual forneceu o material para estudo, para ser feita sua análise química. O equipamento utilizado para análise por fluorescência de raios x, que pertence à empresa, é do fabricante PANalytical.

4.4. Análise de densidade estrutural

A densidade estrutural da amostra foi determinada pelo picnômetro a gás (hélio) da Quantachrome Corporation (modelo Ultrapycnometro 1200e version 4.00), localizado no Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP.

4.5. Análise de área superficial e volume de microporos

As análises de área superficial e volume de microporos também foram realizadas no Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP, através do BET da Quantachrome Corporation (modelo Ultrapycnometro 1200e), pelo método de adsorção de nitrogênio. Para preparação da amostra foi realizada sua pulverização.

4.6. Ensaio de desagregação

O equipamento empregado na realização da desagregação é conhecido como *scrubber*, e este possui algumas variações. Neste trabalho utilizou-se a célula de flotação com o intuito de se aproximar do funcionamento de uma máquina de atrição e a carcaça de um moinho tubular para simulação de um tambor desagregador. Para aumentar a confiabilidade dos resultados, todos os ensaios foram realizados em duplicata.

4.6.1. Equipamentos

Os equipamentos utilizados nos ensaios de desagregação foram: um tambor metálico (com comprimento interno de 20 cm e diâmetro interno de 20,4 cm), uma célula de flotação e uma cuba de aço com capacidade de 2 litros. Foram utilizados ainda uma peneira com abertura de 6,35 mm (abertura de referência) e uma mangueira para simulação do spray. As características dos instrumentos utilizados estão apresentadas na Figura 4.1.



Figura 4.1: Carcaça de moinho tubular e célula de flotação, respectivamente. Equipamentos estes utilizados nos ensaios de desagregação em escala de laboratório.

4.6.2. Teste preliminar

Uma vez que os ensaios de desagregação têm como objetivo verificar a influência de algumas variáveis operacionais no processo e determinar quais combinações proporcionam melhores resultados, faz-se necessário conhecer previamente a susceptibilidade de desagregação intrínseca do rejeito, para que seja possível analisar a eficácia de cada método de desagregação. Para isso, utiliza-se um teste preliminar.

O teste preliminar foi realizado sem o emprego de técnicas de desagregação, com a intenção de se estabelecer a porcentagem passante em determinada abertura antes de se aplicar qualquer técnica de desagregação, e assim comparar este valor com os outros valores que serão determinados após o emprego das técnicas. Um aumento considerável nas porcentagens passantes caracteriza uma boa desagregação.

A polpa foi preparada para conter as especificações determinadas no início dos ensaios: volume de 1,5 litros e 50% de sólidos em massa. Assim, o material foi quarteado, homogeneizado e uma massa de 1,185 kg foi retirada para constituir a polpa. Após seu preparo, a mesma foi colocada em uma peneira de 6,35 mm sob vibração, recebendo água sobre pressão durante 1 minuto, vinda de uma mangueira com vazão média de 175,95 mL/s a fim de simular um spray, como mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2: Mangueira para simulação de spray.

A abertura da peneira e a vazão do spray foram selecionados conforme os dados utilizados na etapa industrial de classificação utilizada na mineradora em estudo. Assim, a massa retida na peneira foi secada e pesada para obtenção dos resultados.

4.6.3. Ensaios de desagregação utilizando a célula de flotação

Os ensaios realizados na célula de flotação tiveram dois parâmetros operacionais sendo variados. Foram realizadas combinações com o tempo de operação de 2 e de 5 minutos e com velocidade de rotação da célula de 800 e 1000 rpm (Tabela 4.1 e 4.2). Foi utilizada cuba de 2L e polpa com 50%.

Após a realização da desagregação na célula, a polpa foi submetida ao peneiramento na abertura de 6,35 mm sob a água da mangueira (simulando um spray) durante 1 minuto, assim como no teste preliminar. O material retido foi secado e pesado. Subtraindo-se a massa retida da massa inicial, tem-se a massa passante (desconsiderando-se as perdas). Assim, a porcentagem passante foi determinada para cada combinação de parâmetros.

Tabela 4.1: Variáveis operacionais analisadas na célula de flotação e seus respectivos níveis

Variáveis operacionais	Níveis
Tempo de operação - (min)	2 e 5
Velocidade de rotação - (rpm)	800 e 1000

Tabela 4.2: Condição de realização dos ensaios de desagregação na célula de flotação

Ensaio	to (min)	Vr (rpm)
1	2	800
2	5	800
3	2	1000
4	5	1000

4.6.4. Ensaios de desagregação utilizando a carcaça do moinho tubular

Foram realizadas combinações com tempo de funcionamento de 2 e 5 minutos, velocidade de rotação de 40 e 80% da velocidade crítica e o grau de enchimento de 10 e 25% do volume do moinho (Tabela 4.3 e 4.4). Após a realização da desagregação no moinho, a polpa alimentava a peneira de 6,35 mm sob vibração e com adição de água na forma de spray durante 1 minuto. O material retido foi secado, pesado e subtraído da massa inicial, determinando-se então a massa passante. Assim, a porcentagem passante é determinada para cada combinação de parâmetros.

Tabela 4.3: Variáveis operacionais analisadas no moinho e seus respectivos níveis

Variáveis operacionais	Níveis
Velocidade de rotação (%Vc)	40 e 80
Grau de enchimento (%)	10 e 25
Tempo de operação (min)	2 e 5

Tabela 4.4: Condição de realização dos ensaios de desagregação no tambor

Ensaio	Vr (%Vc)	Ge (%)	to (min)
1	40	10	2
2	40	10	5
3	40	25	2
4	40	25	5
5	80	10	2
6	80	10	5
7	80	25	2
8	80	25	5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização do rejeito de minério de ferro em estudo

A Figura 5.1 apresenta a curva de distribuição granulométrica do rejeito. De acordo com a curva de análise granulométrica, 80% do rejeito encontra-se abaixo de 0,150 mm. Pode-se notar também que quase toda a amostra (98,4%) possui granulometria menor que 6,35 mm, ou seja, a desagregação desse material pode aumentar significativamente a recuperação do processo.

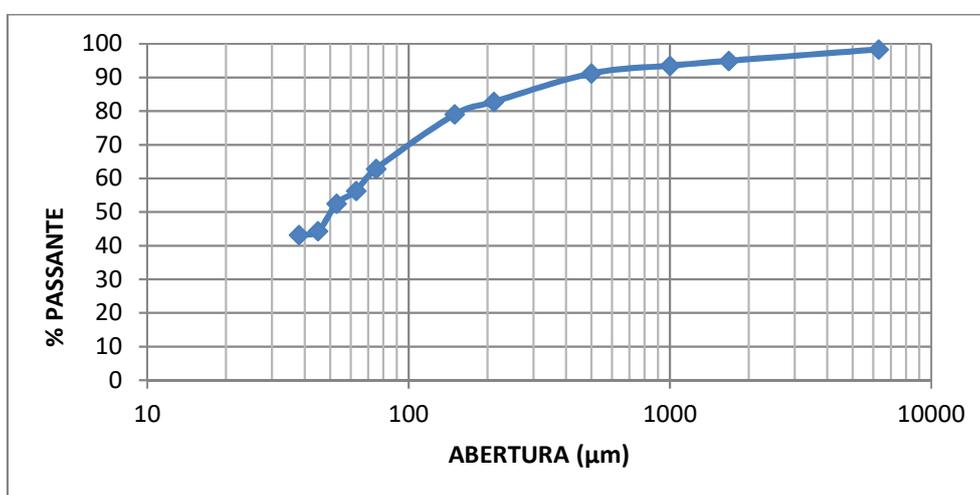


Figura 5.1: Curva da análise granulométrica do rejeito da barragem de uma mineradora de ferro localizada na região da Serra do Itatiaiuçu – MG.

A análise química da amostra determinou que os teores de Fe, SiO₂ e Al₂O₃ foram iguais a 41,16%, 34,57% e 3,25%, respectivamente. A perda por calcinação da amostra foi de 2,64%. Os teores obtidos na análise estão apresentados na Tabela 5.1. Os minerais identificados por difração de raios x foram quartzo, hematita e goethita.

Tabela 5.1: Teores dos elementos majoritários presentes na amostra

Elementos	Fe	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	P	Mn	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO
Teores (%)	41,16	0,64	34,57	0,045	0,042	3,25	0,106	0,082	0,011

A densidade estrutural da amostra, determinada pelo picnômetro a gás, é de 3,8 g/cm³. Sua área superficial e seu volume de microporos, ambos determinados pelo método de adsorção de nitrogênio (B.E.T.), assumiram valores de 11,731 m²/g e 0,006 cm³/g, respectivamente. A umidade do material em estudo é de 11,68%.

5.2. Ensaios de desagregação

Os resultados para todas as combinações entre as variáveis operacionais utilizadas nos ensaios na célula de flotação são apresentados na Figura 5.2.

Em ensaios realizados na célula de flotação a velocidade tem grande influência na porcentagem passante, tendo em vista que o aumento da velocidade resulta em uma melhor desagregação do material, como mostrado na Figura 5.2. Vale ressaltar também que essa influência é intensificada com o aumento do tempo de funcionamento do agitador. A maior porcentagem passante na peneira de 6,35 mm (96,3%) foi obtida com velocidade de rotação igual a 1000 rpm e o tempo de operação de 5 minutos.

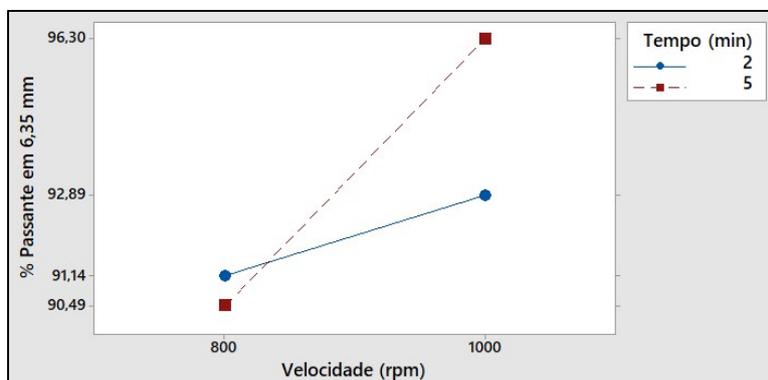


Figura 5.2: Efeito da velocidade e do tempo na desagregação em célula de flotação.

No moinho, o melhor resultado para a desagregação foi de 91,85% passante em 6,35 mm, com o grau de enchimento de 25%, velocidade de 80% da velocidade crítica e tempo de operação de 5 minutos. Os resultados para todas as combinações entre as variáveis operacionais utilizadas nos ensaios na carcaça do moinho são apresentados na Figura 5.3.

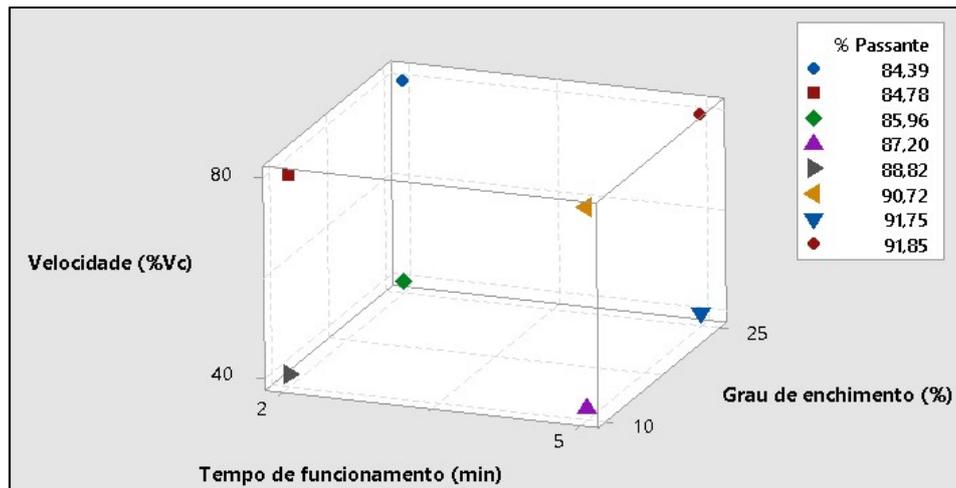


Figura 5.3: Combinações entre as variáveis utilizadas nos ensaios na carcaça do moinho e seus resultados.

A Figura 5.4 mostra que quando a desagregação no moinho é realizada por 2 minutos, a porcentagem passante em 6,35 mm sofre uma diminuição quando o grau de enchimento aumenta de 10 para 25% e os melhores resultados do teste são obtidos em velocidades de rotação igual a 40% da velocidade crítica. Por outro lado, quando o tempo de operação é de 5 minutos, a porcentagem passante aumenta com o aumento do grau de enchimento e a desagregação apresenta melhores resultados em velocidades de rotação de 80% da velocidade crítica.

Em ambos os casos, a menor velocidade de rotação (40% da velocidade crítica) sofre maior influência do grau de enchimento quando comparada à maior velocidade (80% da velocidade crítica), sendo que quando o tempo de operação é de 2 minutos essa influência piora os resultados do processo e quando o tempo de operação é de 5 minutos o aumento do grau de enchimento aumenta a porcentagem passante.

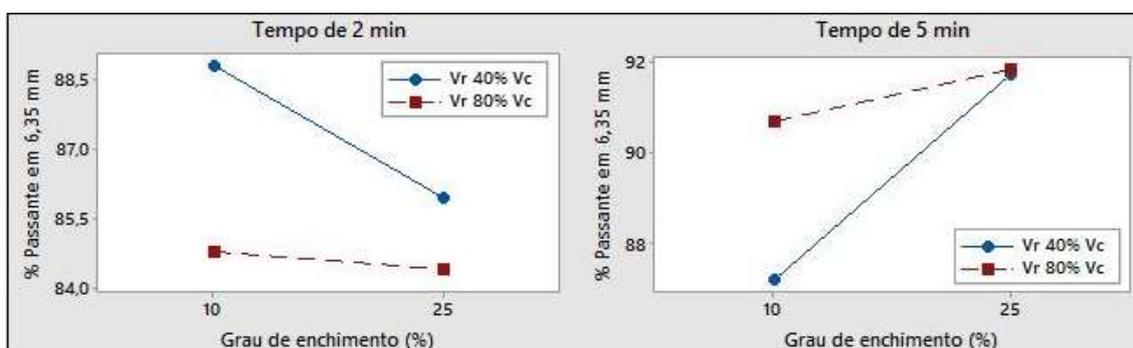


Figura 5.4: Efeito do grau de enchimento na desagregação em moinho para tempos de 2 e 5 minutos.

Outras observações podem ser feitas sobre os ensaios realizados na carcaça do moinho:

- Quando o grau de enchimento é de 10% e a velocidade é de 40% da velocidade crítica, o material se desagrega até o segundo minuto e, do segundo ao quinto, volta a se aglomerar;
- Quando o grau de enchimento é de 10% e a velocidade é de 80% da velocidade crítica, o material se desagrega até o quinto minuto;
- Quando o grau de enchimento é de 25% e a velocidade é de 40% da velocidade crítica, o material também se desagrega até o quinto minuto;
- Quando o grau de enchimento é de 25% e a velocidade é de 80% da velocidade crítica, o material se desagrega até o quinto minuto, quando atinge sua desagregação máxima nos ensaios realizados na carcaça do moinho tubular.

A desagregação do material, objetivo principal deste trabalho, apresentou seu melhor resultado na célula de flotação. A porcentagem passante na peneira de 6,35 mm que antes da aplicação do método era de 81,30%, chegou a 96,30% com a velocidade de rotação de 1000 rpm e o tempo de operação de 5 minutos, tendo um aumento considerável, de cerca de 15%.

6. CONCLUSÕES

A célula de flotação mostrou que seu mecanismo de agitação pode ser muito bem empregado na desagregação desse tipo de material, chegando a aumentar a porcentagem passante em 15%, e apresentou melhores resultados que o moinho nos testes realizados em laboratório. A velocidade é a variável operacional que tem maior influência na porcentagem passante no teste de desagregação em célula de flotação. Os melhores resultados no teste foram obtidos com maiores velocidades.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, A. N. Histórico e Importância da Mineração no Estado. **Revista do Legislativo**, Assembleia Legislativa de Minas Gerais, n. 41, p. 27-32, jan./dez. 2008.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa; 2014.

CARVALHO, P. S. L., et al. **Minério de ferro**. BNDES Setorial 39, p. 197-234, 2013.

COSTA, J. H. B. **Modelagem matemática da operação de desagregação da bauxita de Paragominas – PA**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; 2010.

COSTA, J.; JÚNIOR, H. **Escrubagem da bauxita de Paragominas - PA. Parte 1: influência de variáveis operacionais na desagregação da bauxita**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 2, p. 257-261, 2012.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Projeto A Mineração de Ferro na Serra do Itatiaiuçu**. Relatório Final, julho de 2012.

FORTES, F. F. **Atrição de minério de Ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2012.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 64, n. 2, p. 233-236, 2011.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 7. ed. Brasília: IBRAM, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2017.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira**. Brasília: IBRAM, 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005957.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2017.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2017.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Tratamento de rejeitos é solução alternativa e economicamente viável à barragem de mineradoras**. São Paulo: IPT, 2016. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043>. Acesso em: 25 maio 2017.

JESUS, C. A. G. **Ferro – Sumário Mineral 2014**. Minas Gerais: DNPM, 2015. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/ferro-sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 25 maio 2017.

JESUS, C. A. G. **Economia Mineral do Brasil – Ferro/Aço**. DNPM, 2009.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 963p.

QUARESMA, L.F. **Balanço Mineral Brasileiro 2001, Elemento Ferro**. DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, DF.

QUEIROZ, L. **Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios itabiríticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2003.

SABEDOT, S; SAMPAIO, C. **Ensaio de atrição em pré-concentrado de zircão: um processo semipiloto**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 55, n. 2, 2002.

TAGGART, A.F. **Handbook of mineral dressing**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1945. v.1, p.10-01 a 10-16.

VALE. **Entenda o que são as barragens de rejeito**. 2016. Disponível em: <<http://www.vale.com/samarco/PT/rejeitos-lama-toxica-samarco/Paginas/entenda-barragens-rejeito.aspx>>. Acesso em: 25 maio 2017.