

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

JÚLIA GUIMARÃES SANCHES

**Estudo sobre substituição parcial de corpos moedores metálicos por  
*pebbles* na moagem de usina do Quadrilátero Ferrífero**

São Paulo  
2023

JÚLIA GUIMARÃES SANCHES

**Estudo sobre substituição parcial de corpos moedores metálicos por  
*pebbles* na moagem de usina do Quadrilátero Ferrífero**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências.

Área de concentração:  
Engenharia Mineral

Orientador:  
Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman

Coorientador:  
Prof. Dr. Homero Delboni Junior

São Paulo  
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de maio de 2023

Assinatura do autor: Júlia Sanches

Assinatura do orientador: Maurício J. Guimarães

#### Catálogo-na-publicação

Sanches, Júlia Guimarães

Estudo sobre substituição parcial de corpos moedores metálicos por pebbles na moagem de usina do Quadrilátero Ferrífero / J. G. Sanches -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

159 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Pebbles 2.Itabirito compacto 3.Corpos Moedores 4.Moagem 5.Carga mista I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Às minhas avós Cida e Olga,  
matriarcas responsáveis pela luz da vida  
que me trouxe até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a agência de fomento que incentivou financeiramente o mestrado com regime de dedicação exclusiva CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) a partir do financiamento do edital DS 88887.606604/2021-00. Agradeço também ao Dr. Neymayer Pereira e à empresa Vale S.A. pelo projeto que gerou essa dissertação de mestrado.

Gostaria de agradecer com muito carinho ao meu orientador Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman pelo apoio intelectual, mas acima de tudo, pela parceria profissional e pessoal. Sem o seu incentivo diário, esse projeto não teria ido tão longe. Obrigada por todos esses anos de aprendizados e crescimentos, e por ser um profissional admirável. Que possamos pesquisar juntos por mais muitos anos e artigos.

Obrigada ao meu coorientador Prof. Dr. Homero Delboni Junior por repassar todo o seu conhecimento e por trazer a luz para o caminho da solução sempre que a pesquisa passou por momentos de impasse.

Aos meus colegas do Grupo de Estudos do LTM-USP, obrigada pelas dicas tão construtivas, em especial ao membro ilustre Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves, que além de nos proporcionar a honra de estarmos em sua presença, nos contempla com seu vasto conhecimento e experiência, fazendo com que sejamos engenheiros melhores a cada conversa. O Grupo de Estudos me ensinou que quando nos apoiamos, somos muito melhores.

Aos colegas do LTM COPPE/UFRJ que acompanharam parte dessa pesquisa e acrescentaram muito conhecimento ao trabalho: Prof. Dr. Luis Marcelo Tavares, Dr. Víctor Rodriguez e a todos os técnicos que acompanharam os ensaios.

Aos meus companheiros de trabalho e amigos do dia a dia, Helena, Rodrigo, Rogério e Dora, meus mais sinceros agradecimentos. A rotina da pesquisa, apesar de árdua, com a companhia de vocês fica mais leve.

Agradeço ao LAM, nas figuras da Profa. Dra. Ana Carolina Chierigati e da doutoranda Gabriela Cardoso, minhas amigas pessoais, pelos abraços carinhosos que sempre acolhem, ao LCT por meio da Profa. Dra. Carina Ulsen, da Dra. Juliana Livi e do técnico Lino pela prontidão no dia a dia. Agradeço ao LFQI por meio do Prof. Dr. Laurindo Leal e do doutorando e amigo José Tadeu pela parceria. Ao LAREX,

agradeço por meio do Prof. Dr. Jorge Tenório, da Profa. Dra. Denise Croce e do meu querido amigo Dr. Amilton Barbosa. Minha gratidão ao PPGEMin é pela figura da Beleza por ter sido peça chave nas conquistas burocráticas, além de deixar tudo mais leve ao seu redor. Um abraço especial à Profa. Dra. Patrícia Matai, representando o PMI, departamento acolhedor e amoroso.

Aos irmãos Henrique e Hélio Delboni, agradeço ao apoio técnico e à empresa Interfusão, agradeço a doação de corpos moedores para a realização desta pesquisa.

Agradeço de todo meu coração aos meus pais Eduardo e Débora, meus maiores exemplos e incentivadores. Sem vocês e seus respectivos apoio e dedicação, nada disso seria possível. Obrigada por estarem sempre prontos para embarcar comigo nas minhas batalhas profissionais e pessoais. Vocês me ensinam todos os dias que o amor dá a força, mas que a luta move o mundo.

Obrigada aos meus irmãos Milena e Jonathan, que tornam melhor a minha vida ao saber que tenho ao meu lado os melhores amigos e companheiros. Sei que estaremos juntos em tudo que vier. Aos meus pais secundários Tulio e Vânia e aos meus cunhados André e Marcelo, obrigada por entenderem as centenas de ausências minhas geradas pela vida acadêmica. Às minhas queridas avós Cida e Olga, eu dedico esse trabalho, além dos agradecimentos.

Por fim, mas ainda com muito amor, agradeço aos meus amigos da engenharia, da militância, da minha cidade natal e da vida toda: Marjory Araújo, Bia Nassif, Camila Diniz, Isa Sordi, Amanda Harumy, Gabi Beraldo, Lucca Ignácio, Khaue Ferreira, Thiago Jatobá, Wellington Gomes, Diéssyca Bissoli, Karen Bortoletti, Rafael Meier e Denise Brunoro.

*“Em meio ao asfalto, resgatar nossas raízes  
E gritar que os meus resistem  
Almas livres que um dia alguém prendeu”  
(SOUTO MC, 2019)*

## RESUMO

Com o passar dos anos e a evolução da exploração do minério de ferro no Brasil e no mundo, os custos do beneficiamento mineral tiveram aumentos significativos, por exemplo, com energia e o consumo de corpos moedores metálicos. As usinas do Quadrilátero Ferrífero, que até meados da década de 40 processavam hematita compacta, passaram a processar itabirito friável e, então, itabirito compacto. O itabirito compacto conta com o teor relativamente alto de sílica, aumentando ainda mais o consumo das bolas de aço na sua moagem, podendo chegar a casos de seus custos ultrapassarem os associados com energia elétrica nas operações industriais. O presente trabalho estudou a viabilidade de substituir parcialmente as bolas de aço por *pebbles* – provindo de etapas anteriores do processamento de itabirito compacto – na moagem em moinhos tubulares do beneficiamento de minério de ferro, utilizando uma usina no Quadrilátero Ferrífero como estudo de caso. Nesse caso, a carga do moinho incluiria fragmentos de minério grosso, os chamados *pebbles*, juntamente com bolas de aço, operando assim com uma carga mista. Foram realizados ensaios de caracterização com o itabirito compacto para seu uso como corpo moedor, além de ensaios de moagem em escala de bancada em moinhos com diâmetros de 30 e 58 cm. Os resultados indicam que as partículas grossas de itabirito compacto possuem características adequadas para o uso como corpo moedor. Os ensaios de moagens mostraram que a substituição de 25% de bolas por *pebbles* apresenta resultados promissores, gerando um aumento relativamente pequeno de consumo de energia e com baixo desgaste dos *pebbles*.

Palavras-chave: *pebbles*, itabirito compacto, corpos moedores, moagem, minério de ferro.



## ABSTRACT

As the years went by and with the evolution of iron ore exploitation in Brazil and the world, the costs of mineral processing have increased significantly, e.g., costs with energy and consumption of metallic grinding media. The Quadrilátero Ferrífero plants, that processed compact hematite until the mid-40s, began to process friable itabirite and then compact itabirite. The compact itabirite has a relatively high silica grade, that increases even more the consumption of steel balls in its grinding process and have a direct effect in the process costs, which may even exceed those associated with electricity in industrial operations. The present work studied the viability of partially replacing the steel balls with pebbles – that comes from previous stages of compact itabirite processing – in the tubular mills grinding of iron ore processing, using a plant in the Quadrilátero Ferrífero as a case study. In that case, the mill charge would include coarse ore fragments (pebbles) and steel balls, thus operating with a mixed charge. Characterization tests with compact itabirite as a grinding media were carried out, in addition to bench-scale grinding tests in mills with diameters of 30 and 58 cm. The results indicate that the compact itabirite coarse particles have suitable characteristics to be used as a grinding media. The grinding tests showed that the replacement of 25% of balls by pebbles presents promising results, with a relatively small increase in energy costs and low consumption of the pebbles.

Keywords: *pebbles*, compact itabirite, grinding media, grinding, iron ore.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo da evolução de exploração do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero.....	5
Figura 2 - Mecanismos de fratura para moagem.....	7
Figura 3 - Principais mecanismos de quebra na moagem.....	7
Figura 4 - Demanda de bolas de aço na moagem de cobre no Chile .....	8
Figura 5 - Fluxograma das etapas de moagem, deslamagem, concentração e desaguamento da usina estudada. ....	10
Figura 6 - Circuito FAP.....	14
Figura 7 - Formato de corpos moedores analisados na moagem.....	17
Figura 8 - Fluxograma dos ensaios .....	19
Figura 9 - Moinho 1 - LTM USP .....	23
Figura 10 - Moinho 2 - LTM UFRJ.....	23
Figura 11 - Fluxograma dos ensaios de moagem realizados em escala laboratorial	24
Figura 12 – Ensaios de moagens primárias .....	27
Figura 13 - Ensaios de moagens secundárias .....	27
Figura 14 - Distribuições granulométricas das amostras cabeça.....	32
Figura 15 - <i>Pebbles</i> de alimentação .....	36
Figura 16 - <i>Pebbles</i> após 30 min de moagem no Moinho 1.....	37
Figura 17 - <i>Pebbles</i> após 150 min de moagem no Moinho 1.....	37
Figura 18 - <i>Pebbles</i> após 30 min de moagem no Moinho 2.....	37
Figura 19 - <i>Pebbles</i> após 90 min de moagem no Moinho 2.....	37
Figura 20 - <i>Pebbles</i> de 6 min de moagem com substituição de 50% no Moinho 1 ...	38
Figura 21 - Gráfico da quantidade de partículas por malha no Moinho 1 .....	39
Figura 22 - Gráfico da quantidade de partículas por malha no Moinho 2 .....	39
Figura 23 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 com 0% de substituição.....	41
Figura 24 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 com 100% de substituição. ....	41
Figura 25 – Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição.....	42
Figura 26 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e <i>top size</i> 9,5 mm .....	43

Figura 27 - Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e <i>top size</i> 9,5 mm .....	43
Figura 28 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e <i>topsize</i> 6,35 mm .....	44
Figura 29 - Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e <i>top size</i> 6,35 mm .....	44
Figura 30 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 2 com 0% de substituição .....	45
Figura 31 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 2 com 100% de substituição .....	45
Figura 32 - Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 2 sem substituição .....	46
Figura 33 -Distribuições granulométricas das moagens secundárias no Moinho 1 com 0% de substituição .....	47
Figura 34 - Distribuições granulométricas das moagens secundárias no Moinho 1 com 100% de substituição .....	47
Figura 35 -Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens secundárias no Moinho 1 sem substituição .....	48
Figura 36 - Distribuição granulométrica da moagem secundária no Moinho 2 com 0% de substituição .....	49
Figura 37 - Distribuições granulométricas das moagens secundárias no Moinho 2 com 100% de substituição .....	49
Figura 38 - Análise granulométrica por espalhamento a laser para investigação de geração de lamas nas moagens primárias para $P_{80} = 1$ mm .....	50
Figura 39 - Análise granulométrica por por espalhamento a laser para investigação de geração de lamas nas moagens secundárias para $P_{95} = 0,150$ mm.....	51
Figura 40 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem primária no Moinho 1 .....	54
Figura 41 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem secundária no Moinho 1 .....	54
Figura 42 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem primária no Moinho 2 .....	55
Figura 43 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem secundária no Moinho 2.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Usinas que utilizam moagem de <i>pebbles</i> .....	13
Tabela 2 - Condições de moagens.....	25
Tabela 3 - Distribuição em porcentagem mássica dos corpos moedores metálicos. 25	
Tabela 4 - Faixas granulométricas de peneiramento dos <i>pebbles</i> pós-moagem .....	29
Tabela 5 - Resultados das análises químicas obtidas para as amostras cabeça .....	33
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização .....	34
Tabela 7 - Dados energéticos das moagens primárias.....	52
Tabela 8 - Dados energéticos das moagens secundárias .....	53

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1	HISTÓRICO .....	4
2.2	MINÉRIO DE FERRO E O QUADRILÁTERO FERRÍFERO .....	4
2.3	MOAGEM.....	6
2.4	<i>PEBBLES</i> .....	12
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO .....	19
3.2	MOAGENS.....	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil atualmente é um dos três maiores produtores de minério de ferro do mundo (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020). Segundo dados divulgados pela Agência Nacional de Mineração (2019), o minério de ferro é responsável por 78,2% das receitas de CFEM do Brasil. As duas principais Unidades Federativas que arrecadaram 52% e 37% dos *royalties* da mineração são, respectivamente, Pará e Minas Gerais. Esses dois estados também são os maiores produtores de substâncias metálicas, sendo juntos responsáveis por 89% do valor da produção nacional (AGÊNCIA, 2020). Sendo assim, tornam-se importantes os estudos sobre a exploração e processamento mineral de ambas as regiões.

O minério de ferro no Brasil era pouco produzido antes do século XIX, possuindo apenas algumas usinas em Minas Gerais e usando métodos de lavra muito rudimentares (GERMANY, 2002). A partir da década de 40, foram iniciadas as operações de lavra mais modernizadas de hematita em Itabira, no estado de Minas Gerais, permitindo, assim, um aumento significativo da extração e produção (GERMANY, 2002). Até meados da década de 60, o processamento industrial de minério de ferro no Brasil incluía essencialmente apenas as etapas de britagem e peneiramento devido, principalmente, aos teores elevados de ferro e baixo de contaminantes, além das características físicas dos minérios (PINTO; DELBONI JR, 2016; PINTO, 2016). Com a progressiva exaustão das reservas de hematita compacta no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, os novos circuitos industriais passaram a processar os itabiritos e incluir etapas de moagem e de flotação, para liberação e concentração da hematita. Como o teor de ferro dos itabiritos é comparativamente mais baixo do que as hematitas puras, as usinas industriais passaram a processar vazões relativamente maiores de minério, de forma a produzir as mesmas quantidades de produto (PINTO; DELBONI JR, 2016; PINTO, 2016; SOUZA, 2010). Com o aumento da capacidade de processamento nas usinas, aumentou-se também o consumo de energia no processo todo, assim como o custo operacional com o consumo de corpos moedores na etapa de moagem.

A usina foco do presente estudo, está localizada no município de Nova Lima, no estado de Minas Gerais e é alimentada atualmente com minérios cujo processamento incluem etapas de moagem e concentração. As usinas que processavam hematita, passaram a processar itabiritos friáveis e, posteriormente, itabiritos compactos. Devido às diferentes características dos minérios, um dos reflexos da operação estudada foi a implementação da moagem, seguido do aumento acentuado do consumo de corpos moedores, ou seja, o crescimento do consumo de bolas de aço e, conseqüentemente dos respectivos custos operacionais

A moagem, por sua vez, é a operação que normalmente responde pela maior parte do consumo energético das usinas (DELBONI JUNIOR, 2007). O consumo energético e a granulometria requerida se associam de forma que quanto menor a granulometria necessária do produto, maior o consumo energético da etapa de cominuição (CHAVES; PERES, 2012; ROWLAND, 2002). Existem também os custos operacionais de serem usadas bolas de aço, que se distribuem tanto no consumo do corpo moedor e na potência consumida na moagem devido à alta densidade das bolas, quanto no fato de as bolas de aço possuírem um consumo energético incorporado (mineração, fundição e transporte) que pode corroborar a energia específica acrescida no circuito com aproximadamente 3 kWh/t (BALLANTYNE, 2019). Algumas usinas possuem alto consumo de corpos moedores, como é o caso da usina objeto desta pesquisa. Tal usina consome atualmente cerca de 13 kt por ano de bolas de aço para processar itabiritos com vazão média de 1.433 t/h, em duas linhas de moagem primária e secundária, em moinhos de bolas. O minério que alimenta a usina é composto por cerca de 70% de itabirito friável com 30% de itabirito compacto, tendo previsão de aumento da porcentagem deste com o passar dos anos.

Dentre as alternativas para redução do consumo de corpos moedores metálicos nos moinhos industriais instalados na usina estudada, a aqui selecionada para investigação, foi a substituição parcial das bolas de aço por fragmentos grossos do próprio minério, denominados *pebbles*. Neste caso, o relativo baixo grau de enchimento dos moinhos com as bolas de aço seria uma oportunidade para utilização de *pebbles*, uma vez que estes apresentam densidade menor do que aqueles.

A moagem utilizando *pebbles* é praticada em várias operações industriais pelo mundo (DOWLING et al., 2001; HAHNE; PALSSON; SAMSKOG, 2001; POWELL et al., 2011; YAHYAEI et al., 2015). A redução, ou mesmo a eliminação do consumo de corpos moedores, representa uma redução dos custos de operação. Este cenário é particularmente adequado no processamento de minérios muito abrasivos e de baixa tenacidade.

Os *pebbles* podem ser provindos de etapas anteriores do processamento, como britagem e/ou moagem primária autógena ou semi-autógena, ou ainda de fontes externas como seixos rolados ou bolas de cerâmica (CROCKER, 1985; DELBONI JUNIOR, 2007). Na Escandinávia, um comum uso desta moagem é no circuito AG-*Pebbles*, onde a moagem primária é realizada por um moinho AG e a moagem secundária é realizada por moinho de *pebbles*, utilizando como corpos moedores os *pebbles* que foram gerados naturalmente no moinho primário autógeno, tendo aplicação tanto em usinas mais antigas, como é o caso da mina de ferro da LKAB na Suécia (POWELL et al., 2011), como em projetos mais recentes, como uma nova planta de processamento de cobre da mina Boliden AITIK na Suécia (MARKSTROM, 2011). Há pesquisas que analisam a substituição parcial de bolas de aço por *pebbles* também, gerando uma carga mista, como a presente pesquisa (LOVEDAY, 2010, 2001; NKWANYANA; LOVEDAY, 2017, 2018).

Em todas as situações supracitadas, os *pebbles* apresentam formato arredondado, o que difere fundamentalmente da aplicação aqui investigada, pois os fragmentos grossos utilizados serão provenientes das etapas de britagem secundária e/ou terciária da própria usina estudada, ou seja, com formato anguloso. Sendo assim, tal aplicação possui caráter original e inovador.

## **1.1 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é estudar laboratorialmente a possibilidade de substituição de parte da carga de bolas da moagem por fragmentos grossos oriundos das etapas de britagem secundária e/ou terciária, baseado no estudo de caso de uma usina no Quadrilátero Ferrífero. Desta forma, visa possibilitar os estudos em maior escala nesta linha sobre a redução do consumo de corpos moedores no processamento dos itabiritos compactos.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO

A usina que foi usada como base para a presente pesquisa situa-se no estado de Minas Gerais, no sudeste brasileiro, e abrange parte dos territórios dos municípios de Nova Lima e de Itabirito. Este Complexo faz parte do Quadrilátero Ferrífero, área de cerca de 7.000 km<sup>2</sup> localizada na região centro-sul do estado de Minas Gerais e que detém grande riqueza mineral, produzindo ao longo do tempo diversos materiais metálicos como, por exemplo, prata, ferro, manganês e ouro (DORR, 1969).

As reservas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, na região da usina estudada, estão hospedadas nas chamadas formações BIF, sigla para *Banded Iron Formations* e que em português é denominada Formação Ferrífera Bandada. A BIF é caracterizada pela alternância de deposição de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com quartzo ou chert, constituindo o itabirito (JAMES, 1954).

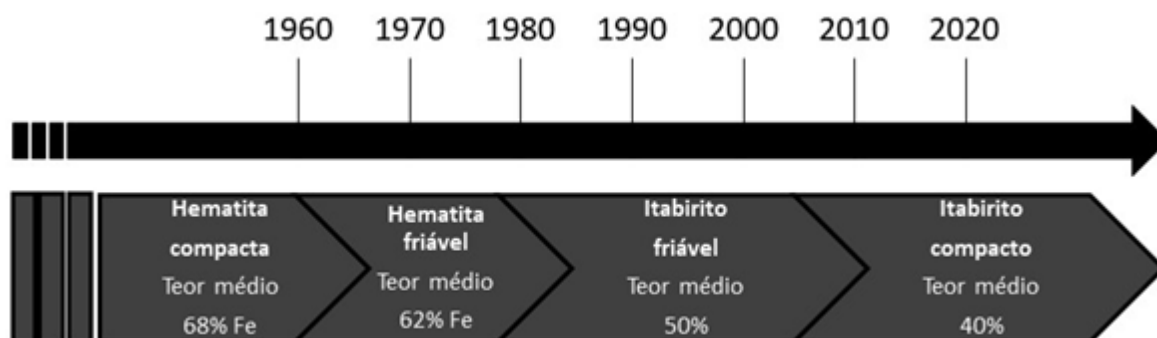
### 2.2 MINÉRIO DE FERRO E O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Segundo Dorr (1964), o itabirito é “a rocha mãe de todos os minérios de ferro”. Sua formação se dá a partir de ferro laminado e metamorfoisada apresentado normalmente como hematita, mas também podendo ser encontrada como magnetita, goethita ou martita, e que se intercala com formações de quartzo cristalino, produto de recristalização do chert ou jaspe (DORR, 1964, 1969). Análises mineralógicas de amostras de itabiritos compactos de minas do Quadrilátero Ferrífero mostram majoritariamente a presença de hematita e quartzo podendo conter, em alguns casos, uma pequena proporção de goethita. Esta classificação é utilizada para denominar itabiritos com menor ação de intemperismo e, conseqüentemente, apresentam liberação mais fina, maior tenacidade e menor teor de ferro (PINTO et al., 2019; RIBEIRO, 2011)

Com a evolução da exploração do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero e as conseqüentes reduções dos seus respectivos teores de ferro, houve a necessidade de alterações nas usinas que processam esse material. De acordo com Pinto (2016a)

este fato mostra a necessidade de novos estudos relacionados ao beneficiamento, de modo a se adequar às especificações adotadas pela indústria siderúrgica. A Figura 1 apresenta uma linha do tempo aproximada da exploração do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero.

Figura 1 - Linha do tempo da evolução de exploração do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaboração própria com dados de Pinto (2016a) e Araújo et al. (2013)

Além das diferenças de teores, há também as diferenças de processamento. Até meados da década de 60, as usinas do Quadrilátero Ferrífero processavam essencialmente hematita compacta, necessitando apenas das etapas de britagem e peneiramento. Por volta do final da década de 1970 e início dos anos 1980, foi iniciado o processamento dos itabiritos, tornando necessárias inclusões de etapas de moagem e concentração nos circuitos industriais da região.

Mesmo entre os itabiritos, existem diferenças no processamento, devido a divergências nas características físicas dos minérios. O itabirito friável se mostra significativamente menos abrasivo que o compacto (PINTO; DELBONI JR, 2016; PINTO, 2016), porém, apesar de não refletir os dados industriais, os itabiritos friáveis podem apresentar maior tenacidade em relação aos itabiritos compactos em ensaios laboratoriais (MAZZINGHY; RUSSO; PIMENTEL, 2013). Uma explicação que pode ser citada é devido às formações geológicas, já que a tipologia compacta apresenta distribuição granulométrica mais fina do quartzo (MAZZINGHY; RUSSO; PIMENTEL, 2013; PINTO, 2016; TURRET et al., 2014), mineral mais tenaz do minério. Outra possível explicação para o dado é a quantidade excessiva de finos presentes na amostra de itabirito friável, que pode prejudicar o ensaio de WI de Bond que estima esta informação (DONDA, 2003; DONDA; ROSA, 2014; FERREIRA et al., 2015;

ROSA; OLIVEIRA; DONDA, 2014). Outra característica do itabirito compacto é a elevada resistência à abrasão (PINTO; DELBONI JR, 2016; PINTO, 2016) sendo assim um atributo indicativo de um bom material para atuar como *pebble*.

### 2.3 MOAGEM

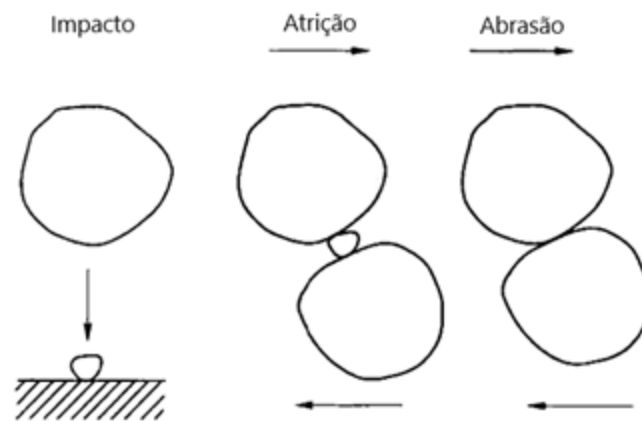
Cominuição, palavra provinda do latim “*comminuere*” e que significa “fazer pequeno”, é, na mineração, a fragmentação controlada de minérios, de forma a se obter um produto com determinado tamanho, podendo ser uma granulometria adequada para o processo de concentração, para a liberação adequada dos minerais ou até para produtos finais (BERALDO, 1987; NAPIER-MUNN et al., 1996). A moagem é a operação de cominuição destinada à geração de produtos com quantidades elevadas de partículas submilimétricas (DELBONI JUNIOR, 2015).

Para que haja a quebra das partículas, é necessário que a atuação das forças seja maior que a das resistências (BERALDO, 1987; KELLY; SPOTTISWOOD, 1982; NAPIER-MUNN et al., 1996). Uma das áreas de estudos da cominuição é relativa aos mecanismos de fratura que podem ocorrer nas rochas, porém, diferentes autores definem os mecanismos de diferentes formas. Kelly e Spottiswood (1982) e Beraldo (1987), dividem os mecanismos em abrasão, compressão e impacto, onde, segundo Beraldo (1987):

- a) abrasão: não há força suficiente para fratura em toda a partícula, gerando apenas pequenas fraturas em sua superfície que, por sua vez, geram novas partículas com granulometria muito inferior à original;
- b) compressão: a força aplicada de forma lenta é superior à resistência, gerando assim, poucos fragmentos de grande diâmetro;
- c) impacto: a força aplicada de forma rápida é bastante superior à resistência, gerando assim, vários fragmentos de pequenos diâmetros.

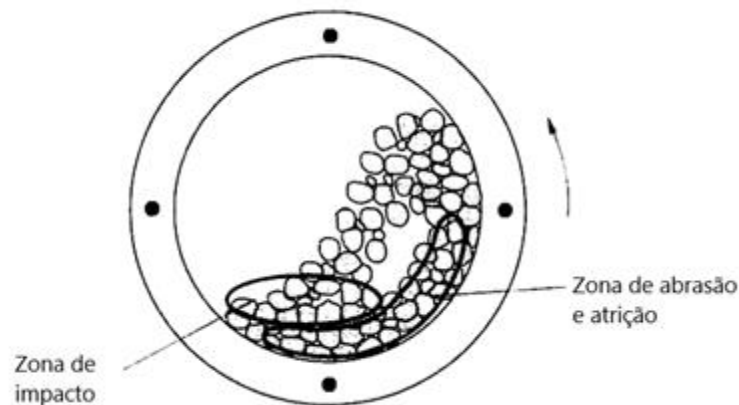
Napier-Munn *et al.* (1996) explicam os mecanismos de fratura para a moagem com outra classificação. São elas: abrasão, atrição e impacto. Tais autores explicam, também, quais desses mecanismos acontecem preferencialmente em quais regiões dentro de um moinho tubular. As Figura 2 e Figura 3 desenham, respectivamente, cada uma das definições.

Figura 2 - Mecanismos de fratura para moagem



Fonte: Napier-Munn (1996) com tradução pela autora.

Figura 3 - Principais mecanismos de quebra na moagem



Fonte: Napier-Munn (1996) com tradução pela autora.

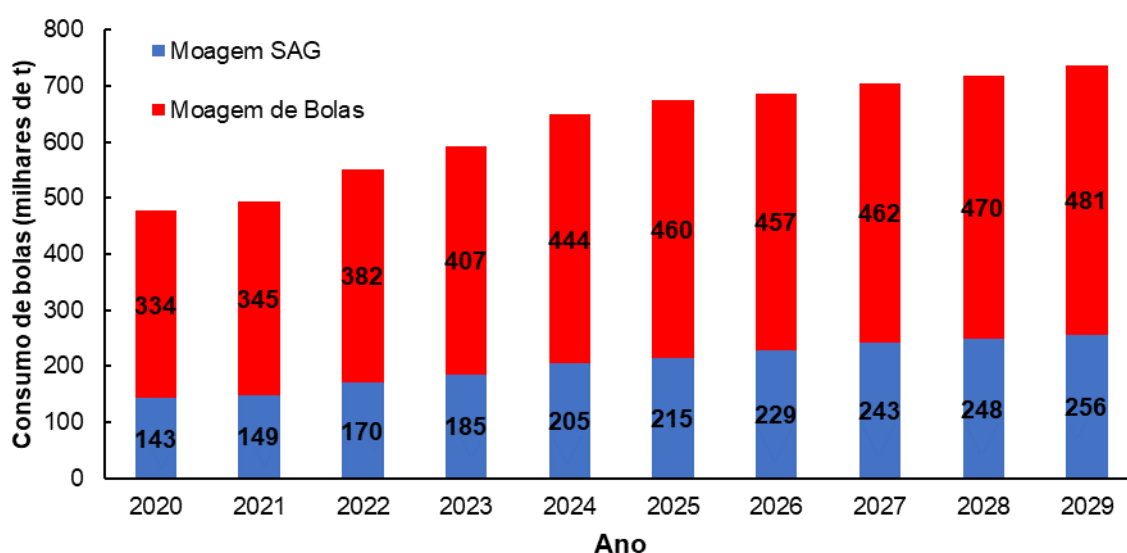
Tais mecanismos de fraturas também são alterados de acordo com os parâmetros da moagem como porcentagem de sólidos e velocidade de rotação, além de características dos próprios materiais em processamento, como a densidade real (NAPIER-MUNN et al., 1996).

Delboni Jr (2007) enfatiza que as preocupações econômica e ambiental têm por consequência estudos na área da fragmentação, há cerca de um século e meio, que associam o consumo energético das usinas com a granulometria requerida de forma que quanto menor a granulometria de interesse, maior o consumo energético da etapa de cominuição.

A etapa de moagem necessita de grandes investimentos na implantação e operação, sendo comumente conhecida por ser a área de maior consumo de energia e por necessitar de materiais mais resistentes ao desgaste da mineração (BALLANTYNE, 2019; CHAVES; PERES, 2012; ROWLAND, 2002). Um dos principais itens dos custos de operação na etapa de moagem das usinas é o consumo de corpos moedores. Ou seja, na moagem em moinhos de barras, são as barras de aço que devido ao seu desgaste precisam ser repostas e, por sua vez, as bolas nas moagens em moinhos de bolas e moinhos semi-autógenos (CHAVES; PERES, 2012).

Segundo dados de Cochilco (2019), ilustrados na Figura 4, as estimativas de consumo de bolas na grande mineração de cobre do Chile entre 2020 e 2029, são de crescimento significativo, de acordo com a quantidade de minério processada nas usinas. Tais dados foram projetados a partir da estimativa de aumento na produção de cobre no Chile, e considerando um consumo médio de 700 g de bolas por tonelada de minério processado.

Figura 4 - Demanda de bolas de aço na moagem de cobre no Chile



Fonte: Elaboração própria com dados de (COCHILCO, 2019)

Os dados apresentados por Cochilco (2019), portanto, reforçam a necessidade de estudos visando a otimização da moagem de maneira a otimizar também o consumo de corpos moedores.

As características dos minérios de ferro que alimentam as minas da usina estudada passaram por alterações, conforme citado na seção 2.2. Com o processamento de minérios de menor teor e menor grau de liberação, fez-se necessária a implementação das etapas de moagem e de concentração na usina de beneficiamento. Atualmente, o beneficiamento do itabirito inclui etapas de moagem e de flotação, de forma a atingir as especificações do produto *Pellet Feed*<sup>1</sup>.

Considerando as consequências supracitadas do processamento de minérios de menor teor de ferro, comparativamente com um de maior teor, também há a necessidade do aumento da capacidade da usina, ou seja, da vazão mássica do ROM, de maneira a se manter a produção final. Sendo assim, foi instalado em meados de 2015, na usina estudada, um circuito de cominuição de grande capacidade, contando com quatro moinhos de bolas de 18' x 29' com 4 MW de potência de motorização, divididos em duas linhas, cada uma contando com etapas primária e secundária de moagem.

Na usina estudada, o consumo específico de corpos moedores de aços<sup>2</sup> está entre 500 e 700 g/t. Considerando que cada uma das duas linhas de moagem da usina é alimentada nominalmente com 1.433 t/h de sólidos e que ambas operam efetivamente 7.800 h/ano, o consumo anual de bolas de aço é estimado em cerca de 13.000 t. Já o consumo energético do Complexo nas etapas primária e secundária da moagem, varia de 5,5 kWh/t a 6,5 kWh/t alimentada. Levando em conta os valores de Abrasion Index (AI) de Bond do Itabirito friável como 0,2 (FREITAS, 2014) e do itabirito compacto como 0,49 (PINTO, 2016), é possível fazer um cálculo de estimativa do consumo de corpos moedores metálicos. Segundo cálculos proposto por Bond e atualizado por Valcárcel (VALCÁRCEL, 2005), a partir desses valores de AI e considerando o consumo energético da usina em questão como 6 kWh/t, seria previsto um consumo de corpos moedores de 312 g/t e 426 g/t, respectivamente, se os minérios fossem processados separadamente. Sendo assim, como a alimentação do circuito trata-se de um minério composto por 70% de itabirito friável com 30% de itabirito compacto, trata-se de um consumo de corpos moedores mais alto do que o esperado, sendo o

---

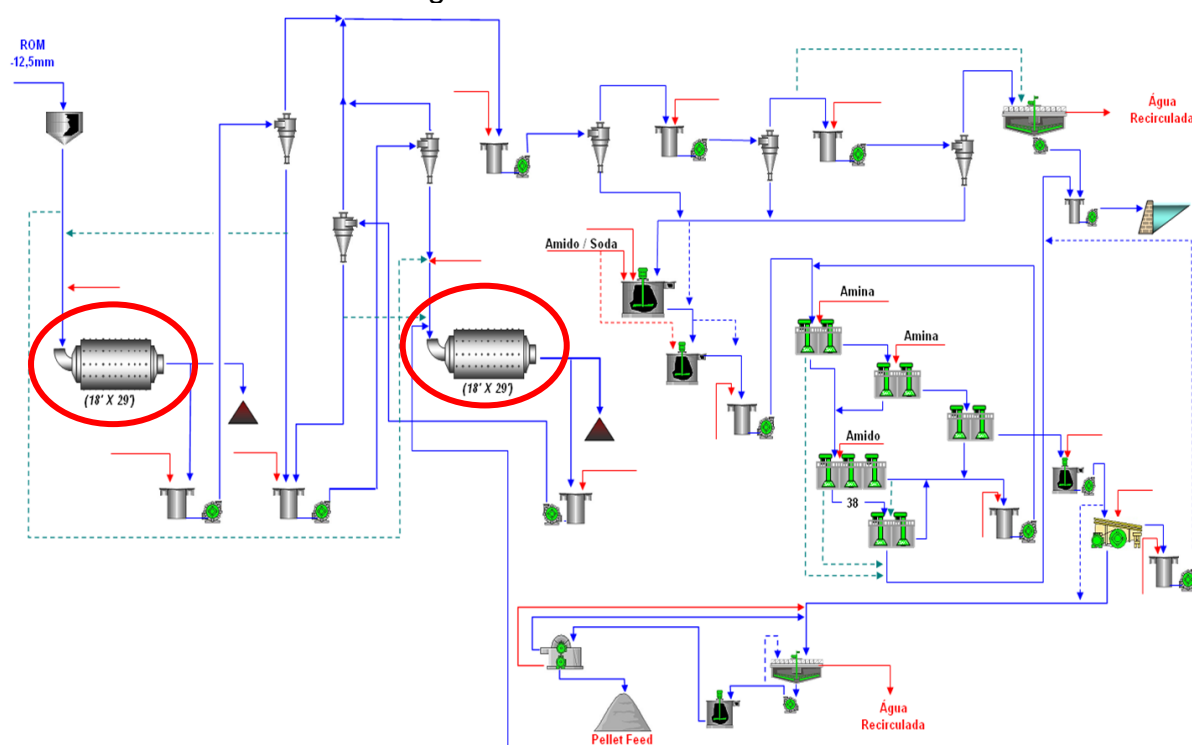
<sup>1</sup> Tipo de produto de minério de ferro com a granulometria mais fina produzida na usina, de especificação granulométrica menor que 0,150 mm

<sup>2</sup> Dados fornecidos pela empresa em reunião pelo Google Meet na data de 24 de novembro de 2020.

valor de 700 g/t o consumo médio de bolas de aço na grande mineração de cobre do Chile, que é considerado alto (COCHILCO, 2019)

A Figura 5 apresenta o fluxograma da usina, destacando as etapas de moagem primária e secundária, objeto dos estudos aqui descritos.

Figura 5 - Fluxograma das etapas de moagem, deslamagem, concentração e desaguamento da usina estudada.



Fonte: Relatório Interno<sup>3</sup>

A usina em questão possui capacidade ociosa nas etapas de moagem. Isto permite a possível implementação de substituição parcial das bolas de aço por *pebbles* como corpos moedores. Devido ao fato dos *pebbles*, possuírem menor densidade do que as bolas de aço, esses demandam aumento no volume da carga de corpos moedores nos moinhos para que seja mantida a potência consumida, ou então pode-se operar com o mesmo enchimento, porém com uma menor potência de operação. O estudo do consumo energético na moagem se faz, portanto, necessário, para que se possa estimar a viabilidade técnica da substituição proposta.

<sup>3</sup> Relatório interno cedido pela empresa Vale contendo o fluxograma da etapa de moagem da usina estudada

Para realizar os estudos propostos faz-se necessária a análise do consumo energético utilizando ensaios laboratoriais. Os ensaios mais difundidos para tal análise da moagem são os WI de Bond para moinhos de bolas e o método do JKMRRC denominado *Drop Weight Test* para as moagens semi-autógenas (CHAVES; PERES, 2012; DONDA; ROSA, 2014; NAPIER-MUNN et al., 1996). Apesar destas técnicas serem bastante difundidas no meio mineral, ambas apresentam limitações, como a massa utilizada para os ensaios da ordem de 10 kg ou mais e as faixas granulométricas grossas, de até 63 mm no caso do DWT. Ambos possuem ensaios simplificados como alternativa.

Para o DWT, ensaios simplificados incluem o SMS Test (MORRELL, 2004), HIT (KOJOVIC, 2016), Geopyora e DWT Simplificado. Serão descritos aqui os dois ensaios utilizados na presente pesquisa. O primeiro, denominado DWT simplificado foi desenvolvido por Chierigati (2001) (2010) com uma versão simplificada do DWT que utiliza apenas uma fração das 5 utilizadas no ensaio padrão. O Geopyora breakage test foi desenvolvido por Bueno et al. (2021), utiliza um equipamento com duas rodas girando em sentidos opostos que, por esforços de compressão, quebram a partícula passante entre elas e a força utilizada para a quebra é medida e utilizada para os cálculos que resultam em um índice de quebra.

Já para o WI de Bond, um ensaio de similaridade é o denominado *Jar Test*. Donda (2003) e Donda e Rosa (DONDA; ROSA, 2014) apresentaram resultados de ensaios para a previsão do consumo específico de energia a partir do *Jar Test*, para a Samarco. Tal ensaio foi validado com dados de cerca de um ano de operação da Samarco Mineração para ensaios referentes à remoagem. Os autores a usam também para as demais etapas de moagem, incluindo situações semelhantes às que ocorrem na usina que está sob estudo nesta pesquisa. Levando-se em conta os pontos apresentados, foi utilizado neste trabalho o *Jar Test* na realização das moagens, conforme o padrão desenvolvido por Donda. Existem outros ensaios simplificados para o WI de Bond como, por exemplo, o WI Anaconda (ALVES; SCHNEIDER, 2010).

Outro conteúdo relevante para a moagem de minério de ferro, é a geração de lama. Isto se deve ao fato do material fino, conhecido como lama, ser prejudicial no principal tipo de flotação utilizada no minério de ferro: a catiônica reversa (CHAVES, 2013;



LIMA et al., 2016; PEREIRA LIMA; VALADÃO; PERES, 2013). Além disto, estudos mostram que a distribuição granulométrica da amostra de minério de ferro interfere diretamente na flotação, onde uma menor presença de lamas pode levar a ganhos de recuperação metalúrgica que podem chegar a 3%, além de interferir no consumo dos reagentes químicos (PEREIRA LIMA; VALADÃO; PERES, 2013).

## 2.4 PEBBLES

A moagem por *pebbles* trata de moagem em moinhos tubulares utilizando o *próprio minério* como corpos moedores. Estes podem ser bolas de cerâmica ou minérios em faixa granulométrica maior que o material a ser moído, que por sua vez pode ser provindo de etapas anteriores da própria usina ou de fontes externas (CROCKER, 1985). Esse tipo de moagem é considerado como a forma mais antiga de moagem autógena na mineração. A palavra “autógeno” vem do Latim e significa “algo que nasce de si mesmo”. Sabendo que a potência dos moinhos é calculada em função da densidade e do formato destes corpos, os moinhos tubulares que utilizam *pebbles* como corpos moedores consomem menor potência comparativamente aos com bolas de aço (CHAVES; PERES, 2012; CROCKER, 1985; KOIVISTOINEN et al., 1989; LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; ROWLAND, 2002).

Crocker (1985) classifica a moagem por *pebbles* em três tipos:

- a) Run-of-mine ou autógena primária: onde há controle granulométrico apenas no *top size* dos corpos moedores;
- b) Moagem *pebbles*: onde há controle granulométrico superior e inferior dos corpos moedores;
- c) Autógena secundária: quando o *pebble* é do mesmo material que está sendo processado e sua origem é da moagem primária.

Esse tipo de corpo moedor é normalmente escolhido em usinas onde o custo de bolas de aço se torna muito alto, ou usinas onde a economia global favorece o uso dos *pebbles*, ou ainda as que processam materiais que não podem ser contaminados com os íons ferro das bolas de aço. Um exemplo deste uso no Brasil, é a empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos que opera em sua usina com a moagem de *pebbles*, neste caso seixos. A utilização dos seixos de rochas ou bolas de alumina é realizada em escala industrial no processamento de cerâmica com operação a úmido. A escolha

pela não utilização de bolas de aço se deu pela necessidade de os produtos terem teor de ferro sempre menor de 0,1% (HESTER; ARTHUR, 1989; SAMPAIO et al., 2001).

Outro fator favorável ao uso de *pebbles* como corpos moedores é a versatilidade quando provindos de etapas anteriores do processamento, já que apenas mudando a malha de peneiramento das partículas, é possível alterar a carga do corpo moedor e, portanto, alterar o desempenho da moagem de maneira mais rápida que outros corpos moedores metálicos (CROCKER, 1985). Existem usinas que utilizam *pebbles* como corpos moedores em várias regiões do mundo. Alguns exemplos estão contidos na Tabela 1, explicitados os países que as usinas se encontram, juntamente com dados como as dimensões destes moinhos e suas potências instaladas.

Tabela 1 - Usinas que utilizam moagem de *pebbles*

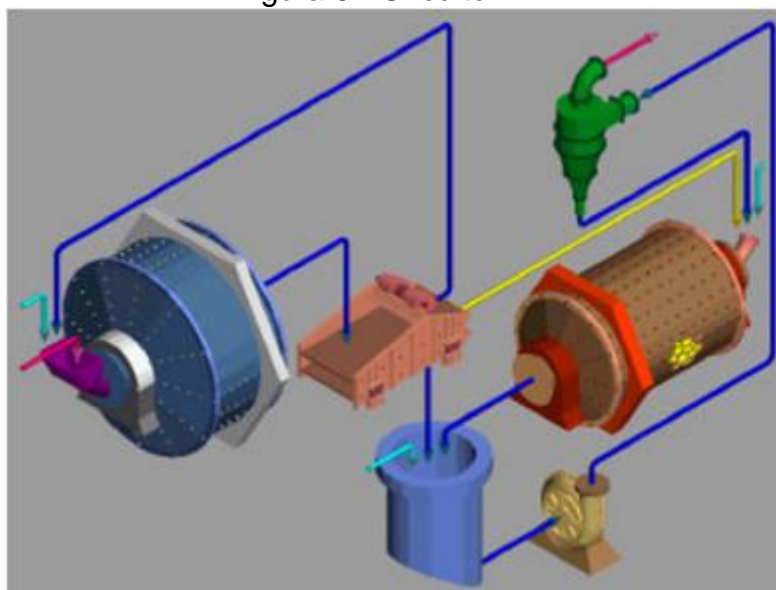
País	Usina	Dimensões do Moinho	Potência instalada	Velocidade de rotação (% VC)	Consumo de <i>pebbles</i> (% do produto)
Finlândia	Kevitsa	28' x 28'	14.000 kW	75%	-
Suécia	Kiruna LKAB	21' x 29'	5.500 kW	76%	0,8 – 1,8 %
Suécia	Boliden AITIK	29,8' x 35,1"	5.000 kW	65%	1 – 1,8%
Estados Unidos	Empire Mine	12,5' x 25,5'	1050 kW	75%	-
		15,5' x 25,5'	1790 kW		
Estados Unidos	Anaconda Copper Company's	15,5' X 32'	1975 kW	-	-
		12,5' x 22'	930 kW		
África do Sul	Buffelsfontein Gold Mine	11' x 10'	-	85%	-
		Bethlehem Copper	2.200 kW	69%	
Canadá	Elliot Lake	9' x 10'		75%	
Brasil	Revestimentos Cerâmicos			60-80%	

Fonte: Elaboração própria com dados de Dowling et al. (2001), Hahne, Palsson e Samskog (2001), Marjlund e Oja (1996), Markstrom (2011), Overton, Smith e Lowe (1975), Pauw et al. (1985), Powell et al. (2011), e Yahyaei (2015)

Uma importante aplicação da moagem de pebbles é na moagem secundária posterior à moagem primária em moinho autógeno ou semi-autógeno. Ele é implementado em casos em que os *pebbles* gerados na própria usina são corpos moedores adequados, com taxas de desgaste menores do que a vazão de produção e as propriedades do minério a ser moído permita seu uso (ROWLAND, 2002).

Os assim denominados circuitos AG – *Pebbles* (ou FAP – *Fully Autogenous and Pebbles*) utilizam o método supracitado, após uma moagem autógena. A Figura 6 apresenta um fluxograma deste tipo de configuração. Delboni Jr (2007) cita a vantagem de utilizar os *pebbles* gerados na etapa primária como corpo moedor da moagem secundária. Tal processamento é comumente utilizado na Suécia e na Finlândia, como os exemplos apresentados na Tabela 1. A empresa Outokumpu criou um sistema denominado *Outogenious*, de obtenção dos *pebbles* dispensando a etapa de peneiramento apresentada na Figura 6. Esta técnica é usada no processamento de minério de urânio, sulfetados e de ferro. Na Escandinávia, dois exemplos do circuito FAP que processam minérios sulfetados são o *Aitic* na Suécia e o *Phihasalmi* na Finlândia. Ainda na Finlândia, a usina *Harjavalta* é um outro exemplo de utilização de moagem por *pebbles*, processando minério de cobre.

Figura 6 - Circuito FAP



Fonte: Delboni Junior (2007).

Um estudo comparativo entre quatro métodos de cominuição apresentado por Koivistoine (1989) discute as vantagens da utilização de moagem autógena e de

pebbles. Os métodos foram: moagem barra-bolas, moagem de bolas em estágio único, moagem SAG com moagem de bolas e AG-Pebbles. Devido ao fato do circuito FAP não contar com corpos moedores externos, seu custo de operação por tonelada produzida foi o mais baixo entre os quatro métodos estudados

Na moagem com *pebbles*, existem algumas condições que necessitam de atenção para a sua otimização. Crocker (1985) propõe que 100% dos corpos moedores sejam compostos por *pebbles*, não somente de maneira a facilitar a implementação de outras condições, como também pelo fato da utilização de bolas poder levar à quebra dos *pebbles*. É indicado também que o *pebble* tenha tamanho tal que possua a mesma massa das bolas de aço se o mesmo moinho fosse de bolas, que os *pebbles* tenham formato arredondado, que a descarga da moagem seja realizada por grelhas, que o manuseio dos *pebbles* seja cuidadosamente projetado para que não haja perdas de suas propriedades, que haja rígido controle granulométrico dos *pebbles*, que a polpa seja de 3 a 5% mais diluída em comparação com moagem de bolas e, por fim, que o silo de *pebbles* tenha a mesma capacidade que o silo de minério. Com isso, tem-se que as condições ótimas quando implementadas juntas, resultando em eficiência de moagem por *pebbles* de até 48% em relação à moagem por bolas de aço em mesma escala (CROCKER, 1985).

Apesar de uma das condições supracitadas ser a utilização de 100% dos corpos moedores como *pebbles*, há estudos que citam o uso de carga mista (carga que utiliza bolas juntamente com *pebbles* como corpos moedores) para suprir necessidades de aumento de capacidade (HESTER; ARTHUR, 1989). Loveday e Nkwanyana estudaram essa substituição parcial de bolas de aço por *pebbles*. A princípio, Loveday (2001) comparou a moagem de bolas com a de *pebbles* observando a energia para a geração de finos e notou que os consumos eram comparáveis. Assim, Loveday (2010) analisou em escala laboratorial o uso de *pebbles* no intervalo granulométrico de 7 a 25 mm, de maneira a preencher os interstícios das bolas de aço de 40 mm, estudando, portanto, a moagem com carga mista. Os resultados foram animadores e a melhor porcentagem de substituição encontrada foi de 75% bolas de aço com 25% de pequenos *pebbles*. O produto continha a mesma quantidade de finos, ou seja, foi

mantida a vazão da moagem, e a economia de energia foi de cerca de 12%, além da economia implícita de 25% menos bolas de aço consumidas.

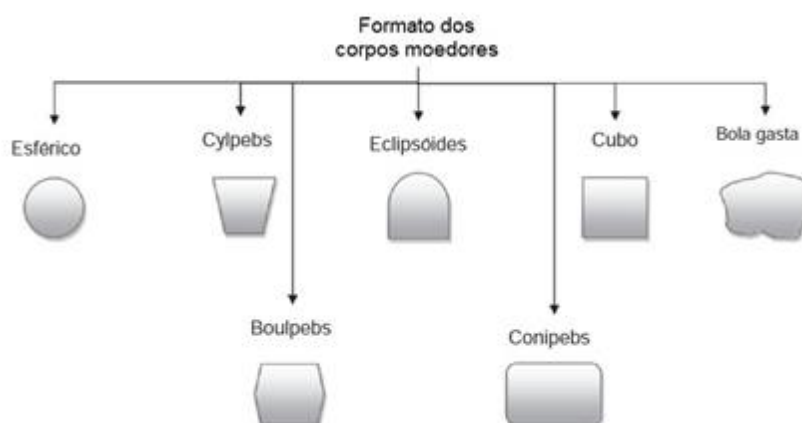
Nkwanyana e Loveday (2017), em continuidade a esse estudo, realizaram ensaios em escala piloto com as mesmas granulometrias dos corpos moedores da primeira pesquisa. Os resultados indicaram alto consumo dos *pebbles*. No entanto, novos ensaios foram realizados, substituindo a faixa granulométrica dos *pebbles* para mais grossa, entre 19 e 75 mm, usando bolas de aço de 37,5 mm, e mantendo a porcentagem de substituição de corpos moedores do primeiro estudo. Neste caso, os resultados mostraram uma redução do consumo de energia de 45,88 kWh/t<sub>finos gerados</sub> para 39,72 kWh/t<sub>finos gerados</sub>, sem prejudicar a produtividade, já que, em massa, a moagem passou de 15,46 kg de finos por hora para 14,92 kg de finos por hora. Esses dados consideram o mesmo resultado de redução de consumo de corpos moedores, ou seja, substituição de 25% de bolas de aço, gerando implicitamente esse mesmo valor de economia com os corpos moedores. Por fim, Nkwanyana e Loveday (2018) usaram, novamente em escala piloto, os parâmetros de moagem SABC (moagem primária com moinho semi-autógeno, seguido de moagem de bolas), com bolas de 75 mm e *pebbles* ainda entre 19 e 75 mm. Os dados mostraram que a vazão de alimentação da moagem caiu com substituição parcial em toda a faixa granulométrica dos corpos moedores. Alterando a substituição para menor uso de *pebbles* nas faixas granulométricas maiores, a vazão de alimentação da moagem foi mantida, mantendo a economia de consumo de corpos moedores e de energia. Em todos os resultados os valores de geração de massa do material na granulometria desejada se mantêm ao tempo que os valores de consumo energético por material gerado na granulometria requerida, diminuem. Esses dados podem ser explicados pelos corpos moedores minerais serem desgastados por abrasão, gerando diretamente material fino, ao mesmo tempo que age quebrando o minério.

Apesar da semelhança de objetivo entre o presente trabalho e os estudos feitos por Nkwanyana e Loveday, cabe ressaltar que há um parâmetro de extrema importância para o desempenho do processamento e que difere entre os projetos: o formato dos corpos moedores. Os *pebbles* provindos de moagens autógenas e semi-autógenas possuem formato arredondado, da mesma maneira que os seixos rolados. O presente trabalho incluiu a utilização dos corpos moedores na etapa de britagem secundária

e/ou terciária e, portanto, sem a etapa de arredondamento. Sendo assim, as partículas tendem a possuir formato mais anguloso e irregular, resultando em alterações potencialmente significativas na eficiência de moagem. Pillay e Loveday (2015) realizaram estudo que previam que haveria diferenças significativas entre o desgaste da alimentação de *pebbles* angulosos em comparativo com *pebbles* arredondados. Estes autores observaram, porém, que a diferença entre tal desgaste é menos acentuada do que o esperado em certos materiais, ou seja, previu-se que os *pebbles* angulosos se desgastassem mais que os *pebbles* arredondados devido à etapa de desgaste para arredondamento, mas em alguns materiais este desgaste não foi significativo.

Shahbazi *et al.* (2020) e Lameck (2005a) avaliaram o impacto do formato dos corpos moedores e sua influência nos resultados das moagens. Alguns formatos citados nos estudos podem ser verificados na Figura 7.

Figura 7 - Formato de corpos moedores analisados na moagem



Fonte: Shahbazi (2020)

Na moagem com bolas, Shahbazi (2020) afirma que há interferências significativas de acordo com o formato dos corpos moedores como, por exemplo, o fato da bola de aço resultar em quebra mais rápida que as bolas gastas. Lameck (LAMECK, 2005) também avaliou a presença de bolas desgastadas em moinhos de bolas. Ele concluiu que a influência pode ser negativa ou positiva, de acordo com a alteração no formato do corpo moedor, mas que os casos específicos precisam ser analisados de maneira individualizada.

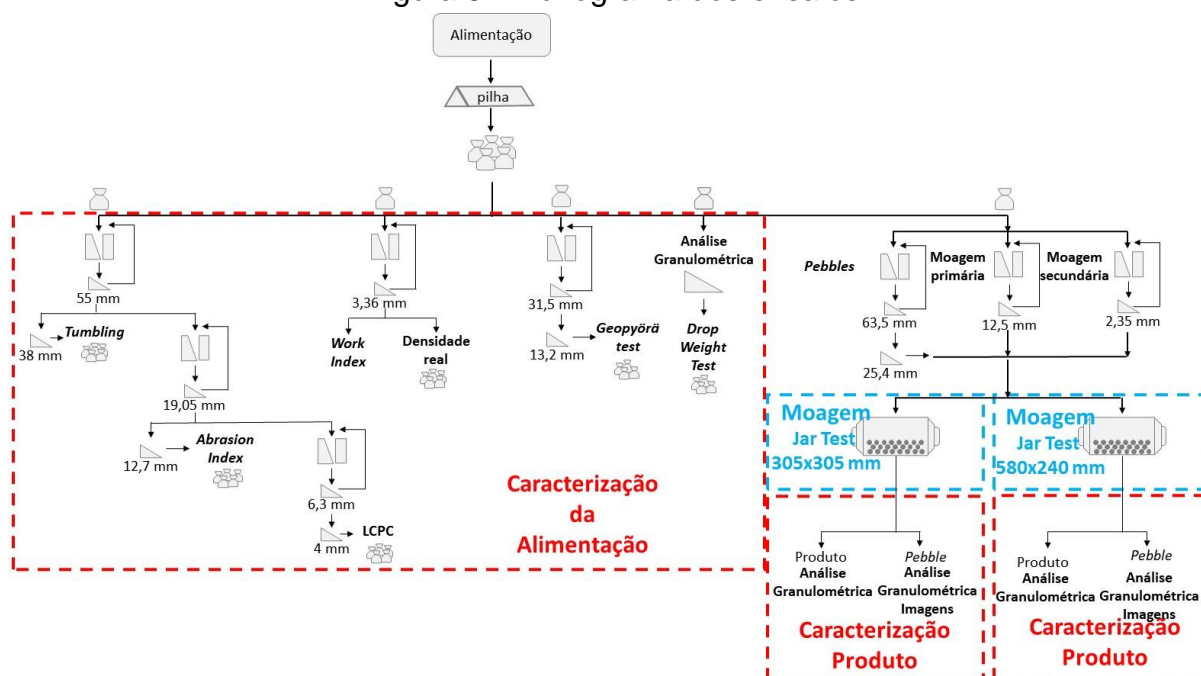
Após analisadas as referências citadas, é reforçada a necessidade de mais estudos comprobatórios sobre o uso dos *pebbles* provenientes da etapa de britagem como corpos moedores para minérios de ferro, além de estudos que visem identificar se há viabilidade do uso de bolas de aço e *pebbles* juntos, como carga mista de corpos moedores, na etapa de moagem. Frente ao exposto, tal necessidade corrobora o objetivo da presente pesquisa, justificados também pelos altos custos de operação com consumo de bolas de aço na operação industrial selecionada, além de que o itabirito compacto possui características concordantes com sua utilização como *pebbles*.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram recebidas as amostras de itabirito friável e itabirito compacto no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais da Escola Politécnica da USP (LTM) em dois momentos distintos. As primeiras amostras tinham cerca de 800 kg de cada um dos minérios e foram recebidas em setembro de 2020. As demais amostras tinham por volta de 1.000 kg de cada minério e foram recebidas em setembro de 2021. Foi solicitado o envio de um segundo conjunto de amostras para que fosse viável realizar uma maior quantidade de ensaios de moagem.

A Figura 8 apresenta o fluxograma simplificado de trabalho, evidenciando os ensaios de caracterização, destacados em vermelho, e os ensaios de moagem, realçados em azul.

Figura 8 - Fluxograma dos ensaios



Fonte: Elaboração Própria

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO

Com as amostras recebidas foram realizados ensaios para analisar as suas características físicas. Os primeiros ensaios tiveram o objetivo de estabelecer as propriedades das amostras recebidas, no que se referiu à utilização como *pebbles*



para moagem, e às diferenças entre os itabiritos de modo a entender quais as consequências do aumento do processamento do itabirito compacto.

A análise granulométrica foi realizada a partir do primeiro conjunto de amostras recebidas em duas etapas: a seco em peneirador quadrado de dimensões 0,5 x 0,5 m para as granulometrias mais grossas (de 152,4 mm a 2,36 mm) e, para as malhas mais finas (menores que 2,36 mm), peneiramento a úmido no equipamento da empresa Haver & Boecker® (modelo EML 450 *digital plus*) que possui vibração com ultrassom. O segundo conjunto de amostra passou pelos demais ensaios e por apresentar dados muito similares, não se fez necessária a repetição da análise granulométrica.

As análises química e mineralógica foram realizadas nos laboratórios da Vale a partir das técnicas de fluorescência de raio x e difração de raio x, respectivamente. O material foi preparado no LTM-USP, por meio de homogeneização, cominuição e quarteamento, e enviado ao laboratório da empresa para a realização dos ensaios.

Dois ensaios para determinação da densidade real dos sólidos foram realizados. O primeiro de picnometria comum, utilizando picnômetros de vidro de volume 100 ml recorrendo à densidade da água como referência. Já o segundo ensaio foi a picnometria a gás Hélio, que compara a variação de pressão do gás em uma câmara de volume conhecido e a câmara que se encontra a amostra.

Para analisar a densidade real dos *pebbles* e das bolas de aço, foi usada um kit hidrostático em uma balança de precisão Shimadzu modelo AUX220. A densidade aparente dos *pebbles* foi calculada a partir de proveta graduada com volume conhecido de 2.000 ml.

O índice de moabilidade denominado *Work Index* foi determinado nas duas amostras conforme ensaio padrão descrito por Bond (1952), utilizando uma malha-teste de 150  $\mu$ m, prezando manter os parâmetros utilizados na operação da usina estudada. Na amostra do primeiro lote, foram feitos dois ensaios: um com a realização do escalpe dos finos no primeiro ciclo e outro sem o escalpe. Para o segundo lote, foi feito o ensaio apenas realizando o escalpe (MCIVOR, 2015).

Foi realizado o ensaio para determinação do *Bond Abrasion Index* (AI de Bond), conforme técnica criada por Bond. O ensaio consiste no tamboramento de 1.600 g de material com granulometria entre 19,1 e 12,7 mm – separado em quatro bateladas de 400g – em um jarro onde é presa uma palheta metálica que gira na mesma câmara deste moinho, conforme descrito por Bergstrom (1985). A partir do desgaste da plaquinha é medida a diferença entre a sua massa inicial e final em condições padrão, e o valor deste delta é o próprio índice de abrasão.

Além do AI de Bond, foi realizado outro ensaio que visou avaliar a abrasividade do material: o ensaio de abrasividade do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2013). Neste caso, uma placa metálica gira a 4.500 rpm dentro de um cilindro fixo contendo cerca de 500 g do material a ser estudado com granulometria entre 4,0 e 6,3 mm. Sendo assim, o LCPC é um ensaio que utiliza menor massa e granulometria mais fina, comparados ao padrão do ensaio de Bond (PERES; MASSOLA; BERGERMAN, 2018; THURO et al., 2007). Ao final do ensaio, assim como no índice de Bond, é obtida a massa final da palheta e comparada com a massa inicial de modo a obter o valor da abrasividade.

Para avaliar a resistência das partículas a quebra por impacto, foi realizado o *Drop Weight Test* (DWT). Trata-se de um ensaio bastante difundido para projetos que incluem moagem Semi-Autógena (SAG) ou Autógena (AG). O ensaio consiste na quebra de uma partícula única que recebe o impacto de uma massa conhecida, que cai de uma altura também conhecida, com posterior avaliação da distribuição granulométrica gerada e da energia gasta para tal (NAPIER-MUNN et al., 1996). Devido à faixa granulométrica de aplicação deste ensaio completo (de 63,0 a 13,2 mm separados em cinco intervalos de tamanhos), foi escolhida a versão simplificada (DELBONI JR; CHIEREGATI; BERGERMAN, 2010) para a sua realização, utilizando apenas a faixa granulométrica -22,4+19,0 mm. Ainda assim, apenas o itabirito compacto pôde ser ensaiado, já que o itabirito friável não gerou massa suficiente para tal. A relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante das partículas gera um valor denominado Índice de Quebra – IQ – que caracteriza o minério pela sua resistência à fragmentação. Porém, para que pudesse haver comparativo entre as amostras na previsão do desempenho da cominuição, foi necessária a realização de outro ensaio que gera um índice similar: o *Geopyörä breakage test*. Este consiste em

duas rodas girando em sentidos opostos que, por esforços de compressão, quebram a partícula passante entre elas. Os resultados apresentam as médias das forças utilizadas, a média da energia específica consumida, o parâmetro  $t_{10}$  (porcentagem passante na malha igual a um-décimo do tamanho original) e a porcentagem de passante na malha teste (BUENO et al., 2021).

Para avaliar a resistência do minério quanto a quebra por abrasão, foi realizado o *Ore Abrasion Test*, também chamado de *Tumbling*. O ensaio consiste no tamboramento, em um jarro de dimensões 300 x 300 mm, de uma massa de 3 kg do minério em questão peneirado e britado na faixa granulométrica -55 +38 mm. Internamente o moinho possui quatro barras elevatórias que propelem a carga sobre ela mesma. O ensaio é realizado com rotação a 70% da velocidade crítica, que neste caso equivaleu a 53 rpm, e processa o material por 10 minutos. Após o procedimento supracitado, foi realizado o peneiramento do produto e o cálculo do parâmetro de resistência à abrasão. Assim como o *DWT*, o *Tumbling* foi realizado apenas com a amostra de itabirito compacto, devido à granulometria necessária para o ensaio.

### 3.2 MOAGENS

Os ensaios de moagem foram realizados em duas etapas. A primeira, realizada na Escola Politécnica da USP, utilizou um moinho com jarro de 300 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, que será denominado Moinho 1. Foi realizado um número grande de ensaios exploratórios, com maior número de variáveis, devido à facilidade de acesso e de manuseio deste moinho. A segunda etapa foi realizada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, em moinho com jarro de 580 mm de diâmetro e 240 mm de comprimento, tamanho esse que permitiu observar com mais clareza a quebra por impacto dos *pebbles*. Este equipamento será denominado Moinho 2.

Os parâmetros escolhidos para as condições dos ensaios no Moinho 1 foram baseados no método desenvolvido por Donda (2003). O jarro utilizado de 300 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento tem revestimento interno liso e conta com medição de torque (equipamento modelo MKDC-50 fabricado pela empresa MK Controle e Instrumentação com 0,3% de erro), possibilitando a avaliação da potência e suas oscilações de acordo com cada condição utilizada para os ensaios. No Moinho 2 foi mantida a medição de torque durante os ensaios (equipamento modelo DR-3000

fabricado pela empresa Lorenz Messtechnik GmbH com 0,1% de erro). As Figura 9 e Figura 10 mostram, respectivamente, os Moinho 1 e Moinho 2.



Figura 9 - Moinho 1 - LTM USP



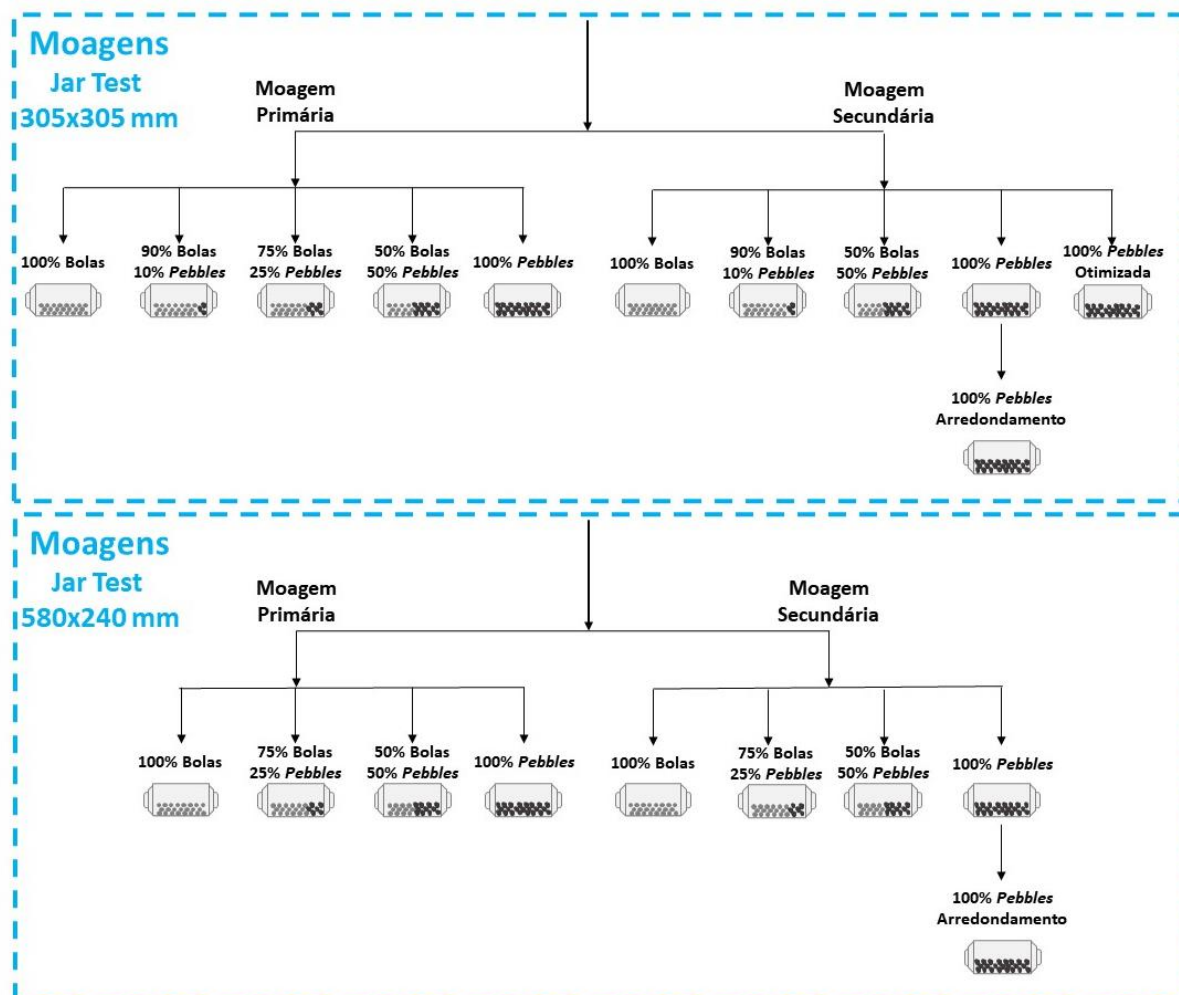
Figura 10 - Moinho 2 - LTM UFRJ

As substituições parciais de bolas de aço por *pebbles* foram feitas em volume para que fosse mantido o grau de enchimento dos moinhos em 30%. As substituições foram de: 0%, 10%, 25%, 50% e 100%. O esquema que representa os ensaios realizados está apresentado na Figura 11.

As moagens foram projetadas de modo a realizar substituições gradativas de corpos moedores metálicos por *pebbles*. Os parâmetros usados nos ensaios foram: grau de enchimento do moinho em 30%, velocidade de rotação 72% da velocidade crítica, ou seja, 55,2 rpm no Moinho 1 e 40 rpm no Moinho 2 e 100% dos interstícios preenchidos por polpa que, por sua vez, continham 74% de sólidos em massa. Estes dois últimos parâmetros foram escolhidos com base nos estudos também de substituições parciais de bolas de aço por *pebbles* realizados por Nkwanyana (2021). A Tabela 2 apresenta os dados dos parâmetros utilizados nas moagens.

Assim como na usina estudada, o material alimentado fora um *blend* com 70% em massa de itabirito friável e 30% em massa de itabirito compacto. Para a moagem primária, o *top size* de alimentação foi de 12,5 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) e para a moagem secundária o *top size* de alimentação foi de 2,35 mm.

Figura 11 - Fluxograma dos ensaios de moagem realizados em escala laboratorial



Fonte: Elaboração Própria

Os corpos moedores utilizados foram: bolas de aço com a distribuição de tamanho calculada a partir do tamanho de alimentação da usina (63.5 mm na moagem primária e 50.8 mm na moagem secundária) e de modo a simular o estado estacionário de uma operação de moagem contínua (CHAVES; PERES, 2012); *pebbles* que estavam na faixa granulométrica -63 mm+25,4 mm para todas as condições de operação, utilizando itabirito compacto – faixa granulométrica próxima de usinas industriais que utilizam a moagem de *pebbles* como, por exemplo, a Empire Mine nos Estados Unidos que conta com corpos moedores na faixa -63 mm +32 mm (DOWLING et al., 2001). A Tabela 2 apresenta os dados das porcentagens em massa das cargas moedoras de bolas de aço em cada condição conduzida nos ensaios e as demais condições utilizadas nos mesmos.

Tabela 2 - Condições de moagens

Parâmetro	Moinho 1		Moinho 2	
	Primária	Secundária	Primária	Secundária
Dimensões internas D x L (mm)	305 x 305		580 x 240	
Carga do moinho – J (%)			30	
Proporção de <i>pebbles</i> em ralação à carga moedora (%)	Bolas	<i>Pebbles</i>	Bolas	<i>Pebbles</i>
Massa dos corpos moedores (g)				
0	31 104	-	88 682	-
10	27 994	1 417	-	-
25	23 328	3 542	66 511	10 100
50	15 552	7 085	44 341	20 201
100	-	14 171	-	40 403
Massa específica do <i>blend</i> de minério (g/cm <sup>3</sup> )			3,56	
Massa de sólidos (g)	4.226		19.175	
Porcentagem de sólidos (%)			74	
Velocidade de rotação (% VC)			72	
Velocidade de rotação (rpm)	55,2		40	
<i>Top size</i> da alimentação	12,7 mm	2,35 mm	12,7 mm	2,35 mm

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 - Distribuição em porcentagem mássica dos corpos moedores metálicos.

Tamanho da bola	Moagem primária	Moagem secundária
65 mm	34%	-
50 mm	43%	40%
40 mm	17%	45%
25 mm	6%	15%

Sabe-se que o moinho 1, com 30 cm de diâmetro, não é o adequado para moer um material tão grosso com os corpos moedores usados, com até 65 mm, que são maiores que 1/10 do tamanho do moinho, como recomendado por Austin et al. (1984). Para tal tamanho de corpo moedor, o ideal seriam moinhos com diâmetros maiores ou iguais a 650 mm. Tal ponto foi observado desde o início do planejamento experimental e por isso a segunda etapa de ensaios foi planejada, com o moinho de maior diâmetro. Os ensaios no moinho menor, no entanto, foram considerados importantes por permitir a avaliação de um maior número de variáveis, o que seria impraticável no presente estudo, considerando as massas de minério e *pebbles* demandadas em cada ensaio com o moinho 2.

A especificação para a granulometria do produto da moagem primária na usina estudada é de  $P_{80}$  em 1 mm, ou seja, 80% em massa passante na malha 1 mm. Para a moagem secundária, a granulometria estipulada para o produto é de  $P_{95}$  em 0,150 mm. Conhecida a granulometria de interesse, foi feita a curva de moagem com mais de um tempo para todas as condições no Moinho 1. No Moinho 2, devido à limitações técnicas como tempo, dificuldade na realização dos ensaios e quantidade de amostra, foi realizado um número menor de ensaios, buscando-se estimar o tempo de moagem a partir dos dados obtidos nos ensaios com o Moinho 1.

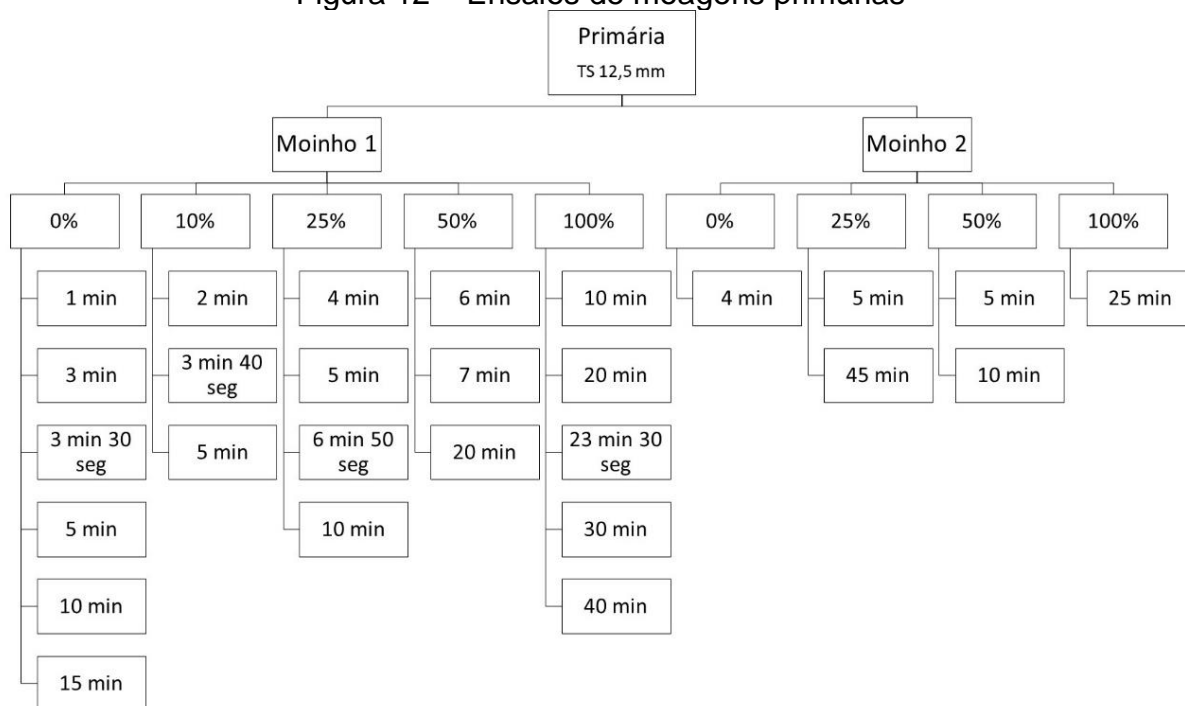
Considerando os resultados obtidos com as moagens primárias no Moinho 1, ficou confirmado que o diâmetro do moinho é pequeno para o tamanho das partículas de minério e dos corpos moedores no caso da moagem primária. Com isso, foram realizadas moagens adicionais com os parâmetros de moagem primária com carga moedora 100% bolas de aço, porém com *top size* do minério em 9,5 mm em dois ensaios e em 6,35 mm em mais dois ensaios.

Por fim, foi feita uma moagem alterando dois parâmetros que permitem a otimização da moagem de pebbles (CROCKER, 1985), que são: aumento da diluição da polpa (de 74 para 69% de sólidos) e aumento da velocidade de rotação (de 72 para 76% da velocidade crítica). A moagem com a condição otimizada foi realizada com corpos moedores integralmente de *pebbles* e apenas na moagem secundária com o Moinho 1.

Todos os tempos de moagens e as porcentagens de substituições utilizadas nos dois moinhos das moagens primárias podem ser encontrados na Figura 12.

A condição de moagem primária com *top size* 9,5 mm foi realizada apenas no Moinho 1, com 0% de substituição e nos tempos 2 min e 5 min. A condição de moagem primária com *top size* 6,35 mm também foi realizada apenas no Moinho 1, mas com tempos de 1 min e 20 seg, 2 min e 5 min.

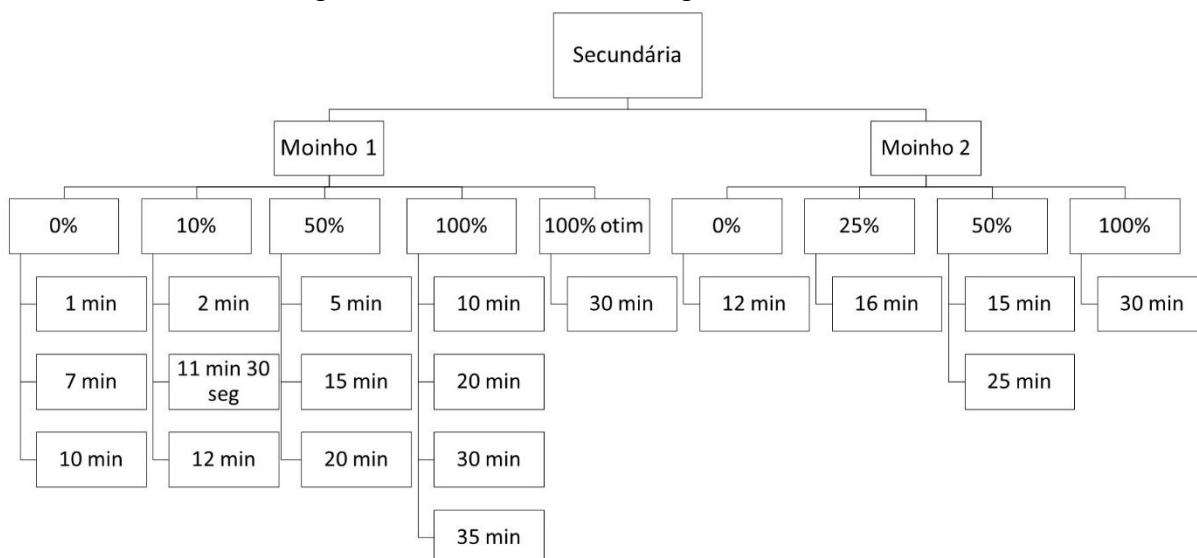
Figura 12 – Ensaio de moagens primárias



Fonte: Elaboração própria

Para as moagens secundárias, os tempos de ensaio em cada condição para cada um dos moinhos se encontra na Figura 13.

Figura 13 - Ensaio de moagens secundárias



Fonte: Elaboração própria

Fica evidenciado nas Figura 12 e Figura 13 que, devido ao tamanho do equipamento e da dificuldade da realização dos ensaios, foram feitas muitas condições e tempos a mais no Moinho 1 em comparação com o Moinho 2. O Moinho 1 utiliza menor massa



de todos os elementos que compõem a moagem, fazendo com que a sua execução seja mais prática.

Inspirado no ensaio *Tumbling*, foi realizada uma última condição de moagem de *pebbles*, de modo a analisar o arredondamento das partículas deste corpo moedor. Os parâmetros usados para a moagem foram baseados na moagem secundária em ambos os moinhos utilizados neste estudo. Foi usado, então, 100% dos corpos moedores com *pebbles* e o minério processado era renovado a cada 30 minutos de moagem, junto com a realização de um peneiramento do corpo moedor. Este corpo moedor após seco e peneirado, era posicionado de forma a realizar um registro fotográfico para análise das partículas através de imagens, além de ter suas partículas pesadas e contadas por faixa granulométrica.

Após todas as moagens, de modo a analisar e comparar os ensaios, foram realizadas análises granulométricas dos produtos e dos *pebbles* e análise das lamas.

Para as moagens primárias foi utilizado o peneirador quadrado 0,5 x 0,5 m até a malha 0,600 mm, o passante nessa malha foi desaguado, seco e quarteado e peneirado no peneirador da *Haver & Boecker* até a malha de 0,038 mm e, por fim, o passante nesta malha dos ensaios no Moinho 1, foi submetido à análise de tamanho de partículas pelo método de espalhamento a laser de baixo ângulo no equipamento da marca *Malvern Panalytical*, modelo Hydro 2.000MU. Para as moagens secundárias a análise granulométrica não necessitou da etapa com o peneirador quadrado devido à faixa granulométrica ser mais fina.

As lamas, na usina estudada, são nominalmente o material com granulometria menores que 0,010 mm (PINTO, 2016). Foram avaliadas as curvas granulométricas de acordo com o caso base, ou seja, com a condição 100% bolas.

Os *pebbles* das moagens passaram por análise granulométrica para acompanhar a perda de massa. Todos os *pebbles* passaram por peneiramentos nas malhas presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Faixas granulométricas de peneiramento dos *pebbles* pós-moagem

	<i>Pebbles</i>	<i>Chips</i>
<b>Primária</b>	-63 mm +25,4 mm	-25,4 mm + 12,5 mm
<b>Secundária</b>	-63 mm +25,4 mm	-25,4 mm + 2,35 mm

Fonte: Elaboração Própria

Segundo a Tabela 4, para os produtos das moagens, os denominados “*pebbles*” foram os materiais que, mesmo depois do ensaio, se mantiveram na faixa granulométrica inicial de corpos moedores formados por itabirito compacto. Já os denominados “*chips*” foram os itabiritos compactos consumidos, porém não a ponto de chegarem na granulometria de *top size* da alimentação da moagem - no caso da moagem primária, 12,5 mm e na moagem secundária, 2,35 mm.

Além das análises granulométricas supracitadas, para os ensaios que visaram acompanhar o arredondamento dos *pebbles*, foram realizados peneiramentos nas malhas: 50 mm, 45 mm, 37,5 mm, 31,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,35 mm, 3,35 mm e 2,35 mm.

Com os valores de torque obtidos nos ensaios de moagem, calculou-se a respectiva energia específica. A potência demandada pelo motor elétrico do moinho foi calculada a partir da Equação (1).

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n (T_c - T_v)}{60} \quad (1)$$

Onde:

P = potência aplicada pelo motor (kW);

n = velocidade de rotação do motor (rpm);

T<sub>c</sub> = torque do moinho cheio (Nm);

T<sub>v</sub> = torque do moinho vazio (Nm);

A partir do valor da potência, calculou-se o valor de energia específica pela equação (2).

$$E = \frac{P \cdot t}{m} \quad (2)$$

Onde:

- E = Energia específica (kWh/t)  
 P = potência aplicada pelo motor (kW)  
 t = tempo de ensaio (horas)  
 m = massa de entrada de minério (t)

Como comparativo, foi calculada a potência aplicada ao moinho também pelo método de Rowland. O cálculo da potência está representado pela Equação (3) (DONDA; ROSA, 2014; ROWLAND, 1982).

$$kWb = 6,3D^{0,3} \sin\left(51 - 22\left(\frac{2,44 - D}{2,44}\right)\right) (3,2 - 3V_p)C_s \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}}\right) \quad (3)$$

Onde:

- kWb = potência por tonelada de bolas (kW);  
 D = diâmetro do moinho interno ao revestimento (m);  
 Vp = fração do volume do moinho ocupada pelas bolas (%);  
 Cs = fração da velocidade crítica (%).

De forma análoga ao cálculo com os dados do torque, a partir dos valores de potência estimados pela Equação (3) foram calculados os valores de energia específica atribuída a cada ensaio pela Equação (2).

Por fim, foram calculadas as energias específicas por tamanho (SSE), ou seja, qual a energia necessária para obtenção de uma porcentagem de um produto em uma granulometria desejada. No caso dos ensaios em questão, para a moagem primária foi calculada a SSE em 1 mm e na moagem secundária em 0,150 mm. A Equação (4) apresenta a fórmula utilizada para o cálculo deste parâmetro. (BALLANTYNE, 2019).

$$SSE_n = \frac{E}{(P_n - F_n)/100} \quad (4)$$

Onde:

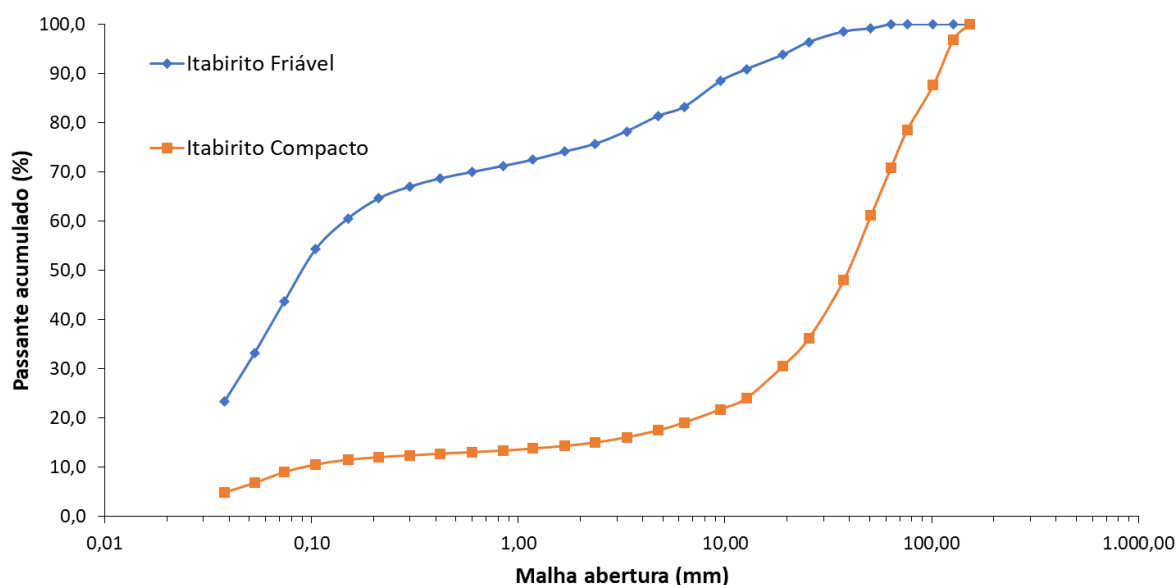
- SSE = energia específica por tamanho na granulometria n (kWh/t de fino gerado);  
 E = energia específica (kWh/t);  
 F<sub>n</sub> = porcentagem passante na granulometria n da alimentação;  
 P<sub>n</sub> = porcentagem passante na granulometria n do produto.

Os cálculos de energia específica foram reproduzidos também com a massa de produto com *top size* de 12,5 mm para moagem primária e de 2,35 mm para moagem secundária dos ensaios com corpo moedor 100% *pebbles*. Isso porque os *pebbles* são consumidos ao longo da moagem e se transformam em produto. Como se trata de ensaio laboratorial em batelada, isto implica em uma diferença nos valores dos cálculos, o que não ocorre no regime contínuo onde são repostos os *pebbles* sempre que estão sendo consumidos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As distribuições granulométricas das amostras iniciais podem ser observadas na Figura 14.

Figura 14 - Distribuições granulométricas das amostras cabeça.



Fonte: Elaboração própria

A Figura 14 mostra que o itabirito friável se trata de um material naturalmente mais fino que o itabirito compacto. A análise granulométrica completa pode ser vista no APÊNDICE A. Isto explica as mudanças na operação da usina conforme a porcentagem de itabirito compacto processado aumenta, além de explicar a não realização de todos os ensaios de caracterização desta pesquisa com ambas as amostras, já que a massa de material recebido não permitiu que o itabirito friável gerasse material nas granulometrias e quantidades requeridas dos ensaios *DWT* e *Tumbling*.

As análises química e mineralógica foram realizadas pela Vale e os resultados foram recebidos por e-mail<sup>4</sup> e estão apresentados no ANEXO A. A Tabela 5 apresenta parte dos resultados das análises químicas de ambos os materiais, juntamente com os resultados das análises mineralógicas e dos dois ensaios de densidade real: a

<sup>4</sup> E-mail com os resultados das análises química e mineralógica recebido em 30 de abril de 2021.

picnometria comum e a picnometria com Hélio. O laudo do ensaio de picnometria com Hélio se encontra no ANEXO B.

Tabela 5 - Resultados das análises químicas obtidas para as amostras cabeça

Amostra	Análise química		Análise Mineralógica		Densidade real	
	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Hematita (%)	Quartzo (%)	Água (g/cm <sup>3</sup> )	Hélio (g/cm <sup>3</sup> )
Itabirito friável	39,3	41,6	56,4	41,3	3,57	3,61
Itabirito compacto	39,1	42,4	54,0	42,6	3,54	3,65

Fonte: Elaboração própria com dados da Vale.

A Tabela 5 indica não haver diferenças significativas de resultados de nenhuma das análises entre o itabirito friável e o itabirito compacto. Na Tabela 5, a análise química, observa-se que o teor de Fe e SiO<sub>2</sub> é muito próximo entre as amostras.

Ainda pelos dados da Tabela 5, na análise mineralógica, apesar do teor de hematita ser mais alto no itabirito friável, esses resultados indicam diferenças de mineralogia significativas entre os materiais.

Para a densidade real, de acordo com os valores da Tabela 5, houve uma diferença entre os dois tipos de ensaios (picnometria com água e com Hélio), explicada pelos diferentes princípios de cada técnica. Apesar destas diferenças, os valores são próximos tanto entre os materiais quanto entre as diferentes técnicas de determinação da densidade real.

As bolas de aço apresentaram densidade real média de 7,52 g/cm<sup>3</sup> a partir da medição por balança hidrostática, assim como os *pebbles* apresentaram densidade média de 3,49 g/cm<sup>3</sup>. Para os *pebbles* foi medida também a densidade aparente, resultando em um valor médio de 1,26 g/cm<sup>3</sup>.

Os ensaios de caracterização das amostras cabeça se encontram na Tabela 6. Alguns ensaios possuem dois resultados pois foram feitos tanto nas primeiras amostras recebidas – aqui denominadas Lote 1, quanto nas segundas – aqui denominadas

Lote 2, de modo a confirmar a similaridade entre elas e, assim, solidificar a comparação entre os ensaios de moagem, independente de qual foi usada.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização

Ensaio		Itabirito friável	Itabirito compacto
Ai de Bond (g)	Lote 1	0,06	0,40
	Lote 2	0,08	0,46
LCPC (g/t)	Lote 1	104	363
	Lote 2	120	374
Britabilidade (%)	Lote 1	48	29
	Lote 2	46	28
Work Index (kWh/t)	Lote 1 sem escalpe	10,8	6,8
	Lote 1 com escalpe	5,9	6,6
	Lote 2	6,5	7,3
Drop Weight Test – Axb	Lote 1	-	88
Geopyora – Ecs (kWh/t)	Lote 1	0,17	0,56
Geopyora – Axb	Lote 1	458	43,8
Geopyora – BWI (kWh/t)	Lote 1	6,1	11,6
Tumbling - $t_a$	Lote 1	-	0,48
	Lote 2	-	0,56

Fonte: dados próprios

Pela Tabela 6, pode-se notar que nos dois ensaios que analisam o índice de abrasividade, ou seja, tanto no AI de Bond quanto no LCPC, os resultados indicam que o itabirito compacto possui índice significativamente maior que o itabirito friável. O primeiro é classificado como altamente abrasivo e o segundo como moderadamente abrasivo (NORGAARD, 2019). Os laudos dos ensaios de AI se encontram no APÊNDICE B e dos ensaios de LCPC se encontram no APÊNDICE C. Dados fornecidos pela empresa que opera o circuito estudado indicam que o consumo de corpos moedores aumentou no circuito de moagem, juntamente com o início do processamento de itabirito compacto, corroborando os resultados dos ensaios de índice de abrasividade. Porém, segundo o cálculo da estimativa do consumo de corpos moedores pelo AI de Bond da amostra, conforme a Equação (5) (VALCÁRCEL, 2005), para o itabirito friável o consumo médio deveria estar em torno de 209 g/t, e para o itabirito compacto de 407 g/t. Esses dados mostram que, apesar da alimentação da moagem ser cerca de 70% itabiritos friável e 30% itabiritos

compacto, o desgaste de corpos moedores da usina, que é em torno de 650 g/t, está mais acentuado que o esperado.

$$\frac{lb}{kWh} = 0,20(Ai - 0,015)^{0,33} \quad (5)$$

Onde:

lb/kWh = consumo de bolas estimado;

Ai = índice de abrasividade medido pelo ensaio de Bond.

Os resultados dos primeiros ensaios de WI do lote 1, presentes na Tabela 6, foram realizados sem escalpe dos finos e indicam o consumo energético do itabirito friável maior que o itabirito compacto, gerando dados que não acompanham o observado industrialmente, segundo relatos da equipe da empresa. Os laudos dos ensaios de WI se encontram no APÊNDICE D e no ANEXO C. Como discutido na revisão bibliográfica, tal resultado já foi observado em outros circuitos, podendo ser atribuído a problemas na execução do ensaio, devido ao excesso de finos, ou a granulometria fina do quartzo, mais tenaz (FERREIRA et al., 2015; MAZZINGHY; RUSSO; PIMENTEL, 2013, 2014; MCIVOR, 2015; TAVARES et al., 2012). Foram realizados posteriormente ensaios com escalpe de ambos os lotes de amostras e os resultados foram mais próximos do circuito industrial e entre os lotes.

O DWT apresentou um índice de quebra com valor 88, classificado, assim, com baixa resistência ao impacto (LYNCH, 2015). Esse dado é um ponto de atenção para o uso do itabirito compacto como corpo moedor, pois pode ter altas perdas para a quebra por impacto causada pelas bolas de aço da carga mista. O laudo com os resultados do ensaio de DWT se encontra no ANEXO D. O Geopyörä apresentou dados que mostram que o itabirito compacto é significativamente mais competente e tenaz que o itabirito friável, a partir dos dados de Ecs e BWI (BUENO et al., 2021). As estimativas do parâmetro Axb, mesmo parâmetro do ensaio DWT, mostrou que o itabirito compacto é substancialmente mais resistente ao impacto que o itabirito friável. Os resultados completos dos ensaios do Geopyörä podem ser encontrados no ANEXO E.



Para a resistência à abrasão, ou seja, o ensaio *Tumbling*, o itabirito compacto apresenta o índice  $t_a$  valorado em 0,48 na primeira amostra e 0,56 na segunda amostra, ou seja, o minério é considerado de moderadamente macio (LYNCH, 2015). Pinto (2016) também realizou o ensaio de *Tumbling* para itabirito compacto e obteve um índice de valor de  $t_a$  de 0,55, em linha com o resultado obtido no presente estudo. Os resultados fazem o material se tornar interessante para o estudo da viabilidade de torná-lo corpo moedor, já que ele é, portanto, medianamente resistente à quebra por abrasão, com uma tendência de gerar pouca lama e desgaste durante o processamento. O laudo com os resultados do ensaio *Tumbling* se encontra no APÊNDICE E.

As Figura 15 a Figura 19 são referentes às moagens visando acompanhar o arredondamento das angulosidades dos *pebbles* pela quebra por abrasão.



Fonte: Acervo pessoal da autora

Figura 16 - *Pebbles* após 30 min de moagem no Moinho 1



Fonte: Acervo pessoal da autora

Figura 17 - *Pebbles* após 150 min de moagem no Moinho 1

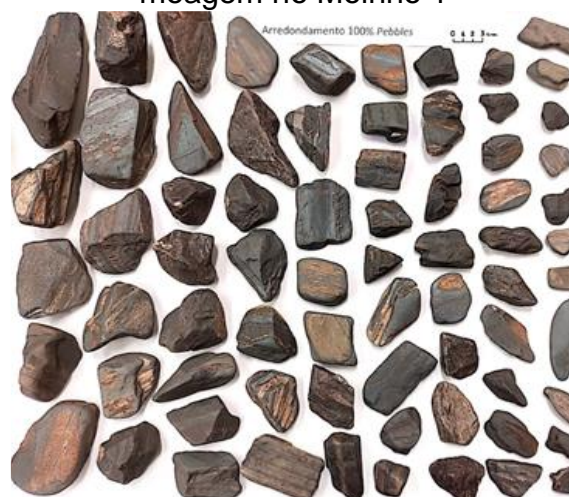
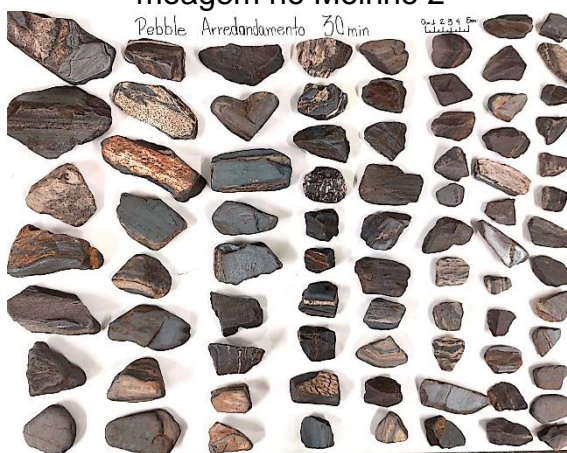


Figura 18 - *Pebbles* após 30 min de moagem no Moinho 2



Fonte: Acervo pessoal da autora

Figura 19 - *Pebbles* após 90 min de moagem no Moinho 2



As Figura 16 a Figura 19 mostram a preservação dos fragmentos após os vários períodos de moagem em ambos os moinhos, com arredondamentos notáveis das arestas, mas sem perdas significativas de massa das partículas, quando comparadas com a Figura 15, que são os *pebbles* como foram alimentados. A resiliência dos fragmentos que assim não se degradaram nas granulometrias originais é uma característica adequada para emprego como corpos moedores. Fica nítida essa conservação, já que existem dois cenários nas imagens: A Figura 17, que ilustra os *pebbles* após 150 minutos de moagem no Moinho 1, ou seja, um tempo grande de processamento; A Figura 19, que apesar de representar menos tempo de moagem

em relação à Figura 17, se refere ao resultado do ensaio em um moinho com diâmetro maior, sendo mais propício a quebra por impacto.

A Figura 20 apresenta os *pebbles* após 6 minutos de moagem no Moinho 1 com 50% de substituição dos corpos moedores. Apesar de não ser parte do ensaio de arredondamento, ela representa o desgaste dos *pebbles* quando processados juntamente com bolas de aço.

Figura 20 - *Pebbles* de 6 min de moagem com substituição de 50% no Moinho 1

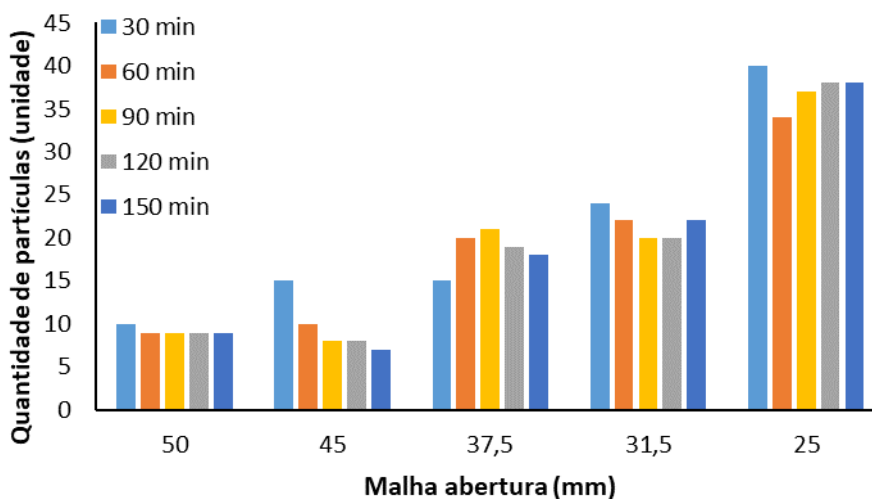


Fonte: Acervo pessoal da autora

A Figura 20, apesar de não ser do ensaio de arredondamento, é importante para notarmos que o desgaste também é pequeno quando analisados os pebbles atuando em conjunto com corpos moedores metálicos. Ficam evidentes que as partículas sofreram pouco desgaste por abrasão, assim como nas demais imagens apresentadas, reforçando as características positivas do itabirito compacto para uso como corpo moedor.

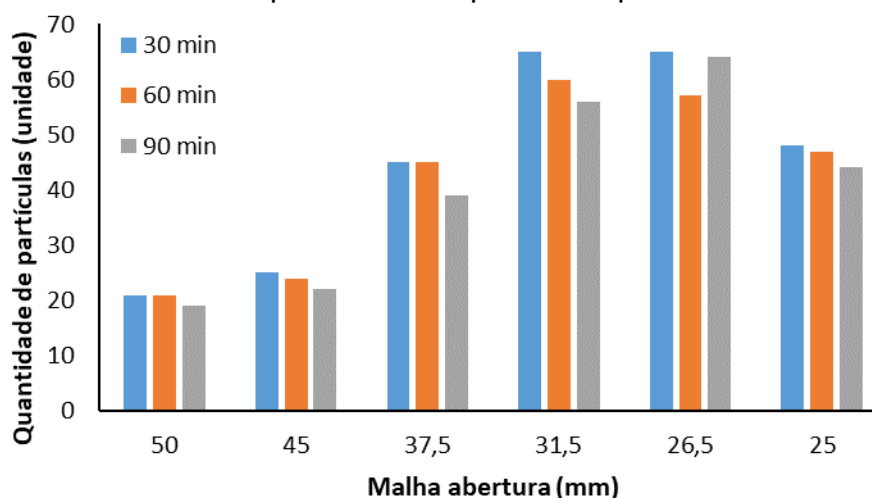
Ainda sobre as análises do ensaio de arredondamento dos *pebbles*, as Figura 21 e Figura 22 apresentam em forma de gráfico, a quantidade de partículas presentes em cada malha a cada 30 minutos de ensaio. Esse dado é importante para avaliar se a quebra das partículas do corpo moedor mineral está ocorrendo por abrasão ou por outro mecanismo de fratura.

Figura 21 - Gráfico da quantidade de partículas por malha no Moinho 1



Fonte: Elaboração própria

Figura 22 - Gráfico da quantidade de partículas por malha no Moinho 2



Fonte: Elaboração própria

Fica evidente nas Figura 21 e Figura 22, que as partículas estão sofrendo apenas quebra por abrasão em sua maioria. Isso pode ser observado devido a quase conservação da quantidade de partículas por faixa granulométrica, além de que quando há perda de partícula em uma faixa, há aumento em uma das faixas abaixo. Por exemplo, na Figura 21, no tempo 30 minutos, existem 10 partículas retidas na malha 50 mm e 15 partículas na malha 45 mm, já no tempo 60 minutos, na malha 50 mm há diminuição de uma unidade de partícula na malha 50 mm, diminuição de 5 partículas na malha 45 mm, porém há aumento de partículas na malha 37,5 mm, sendo este, provavelmente, o destino das partículas que se tornaram passante nas duas malhas anteriores.

Após todos os ensaios de caracterização, pôde-se comprovar que o itabirito compacto pode ser considerado, portanto, um bom corpo moedor, motivando os ensaios de moagem com as substituições dos corpos moedores metálicos por *pebbles*.

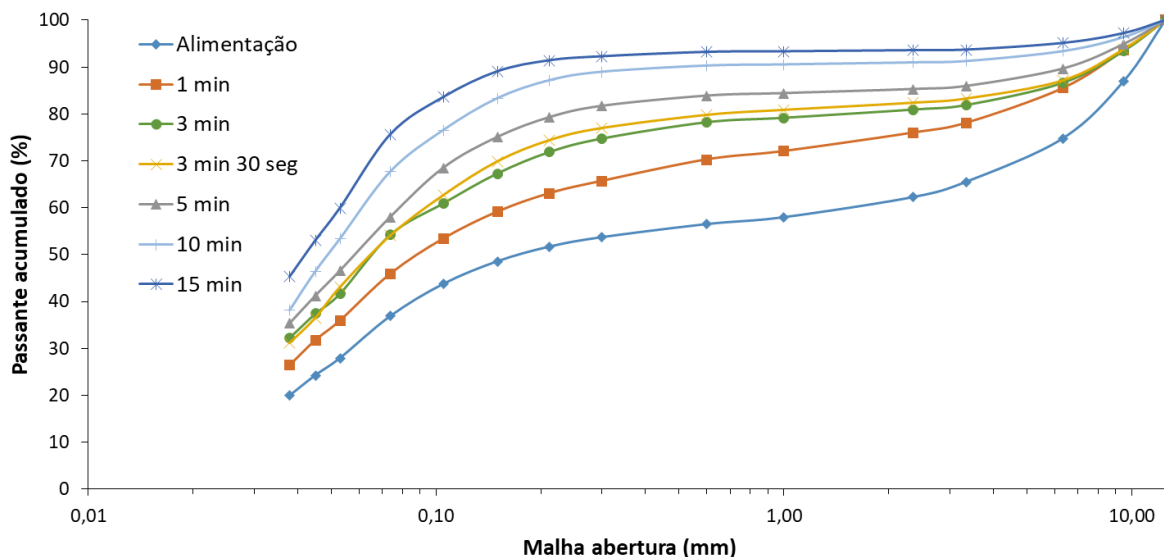
Os ensaios de moagem foram realizados em 4 etapas: moagem primária no Moinho 1, moagem secundária no Moinho 1, moagem primária no Moinho 2 e moagem secundária no Moinho 2. Todos os resultados de todos os ensaios de moagem estão presentes no APÊNDICE F. Para melhor efeito comparativo, os resultados serão apresentados e discutidos comparando isoladamente os dados das moagens primária e secundária, observando as diferenças e semelhanças dos dados entre os moinhos 1 e 2.

Cabem alguns esclarecimentos das nomenclaturas a serem utilizadas. As substituições serão denominadas pela porcentagem de *pebbles* nos corpos moedores. Por exemplo, quando a quantidade dos corpos moedores for 90% de bolas de aço com 10% de *pebbles*, esta substituição será denominada “10% de substituição”. Todos os casos em que o ensaio for citado como moagem primária, entende-se que o *Top size* foi 12,5 mm. Nos dois casos com *Top size* menores, serão explicitados como “Primária 9,5 mm” ou “Primária 6,35 mm”. Quando os dados estão sendo analisados entre as condições, a condição 100% bolas de aço são as consideradas o caso base nas moagens primária e secundária e em ambos os moinhos.

Inicialmente foram analisadas as curvas granulométricas dos produtos das moagens de acordo com a condição e com o moinho utilizado. As Figura 23 e Figura 24 apresentam as curvas granulométricas dos produtos das moagens primárias no Moinho 1 com 0% de substituição e 100% de substituição, respectivamente.

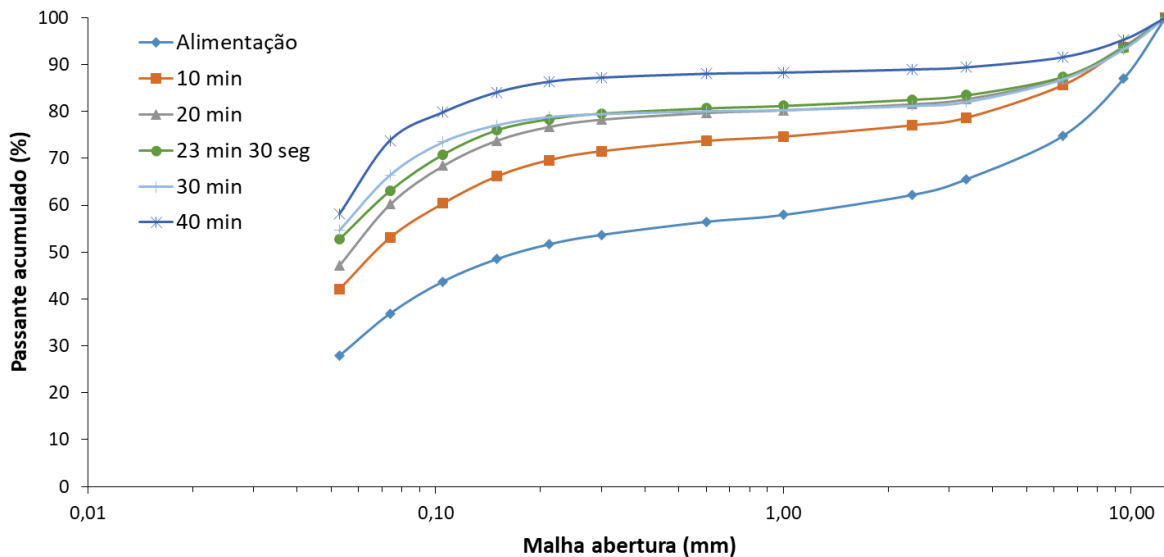
Pode ser observada a horizontalidade das partes centrais das curvas, na região que se encontra a malha de abertura requerida (1 mm), tanto na Figura 23 como na Figura 24, com destaque maior no cenário com substituição de 100% (Figura 24). Este fato dificulta prever o tempo de moagem exato necessário para chegar à granulometria estipulada que, para a moagem primária, é 80% passante em 1 mm.

Figura 23 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 com 0% de substituição.



Fonte: Elaboração própria

Figura 24 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 com 100% de substituição.

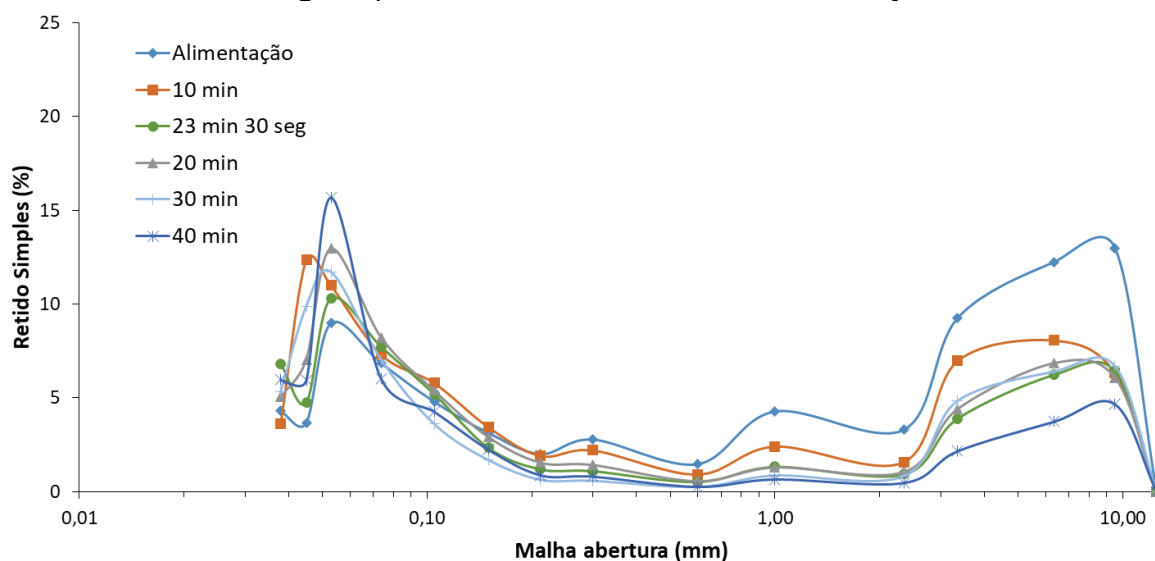


Fonte: Elaboração própria

Observa-se também, pelas Figura 23 e Figura 24, que ainda há uma porcentagem de material acima de 9,5 mm, ou seja, a faixa granulométrica mais grossa da alimentação não foi completamente moída. Esse fato apenas explicita que o moinho utilizado não possui diâmetro suficientemente grande para que os corpos moedores quebrem as partículas grossas de minério. Para melhor analisar esses valores, foi construído o

gráfico de distribuição granulométrica retida simples na condição sem substituição, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição.



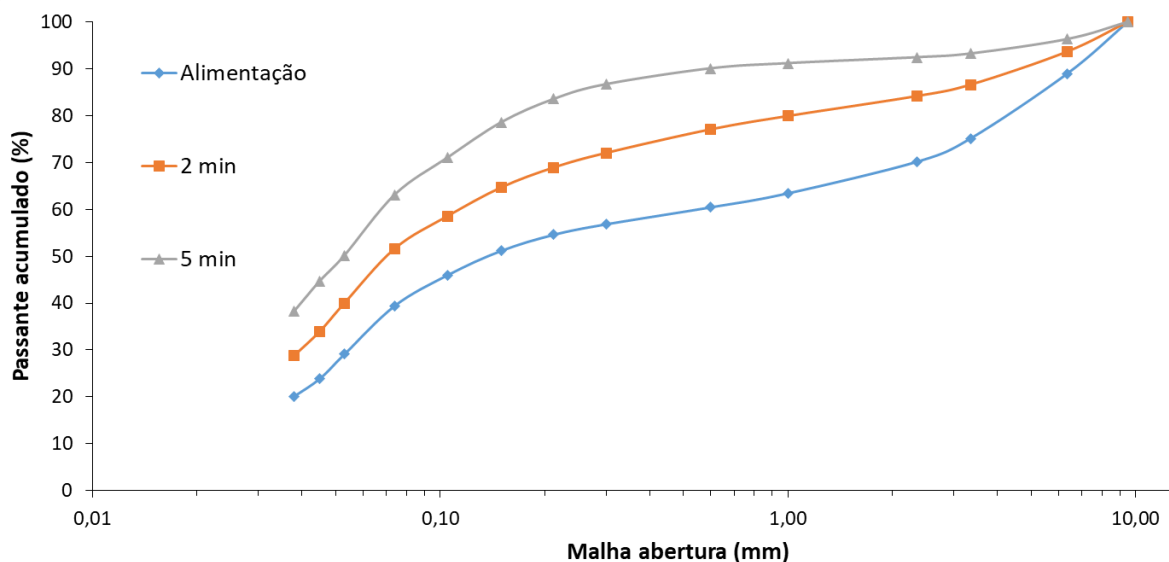
Fonte: Elaboração própria

Na Figura 25 observa-se uma distribuição bimodal em todos os ensaios. Este tipo de distribuição pode ser explicado pela baixa quebra por impacto das partículas grossas, como esperado. O uso do Moinho 1 foi utilizado, como supracitado, pela menor demanda de massa por ensaio, permitindo um maior número de ensaios exploratórios.

As demais condições de substituição da moagem primária no Moinho 1, foram similares às apresentadas nas Figura 23 a Figura 25.

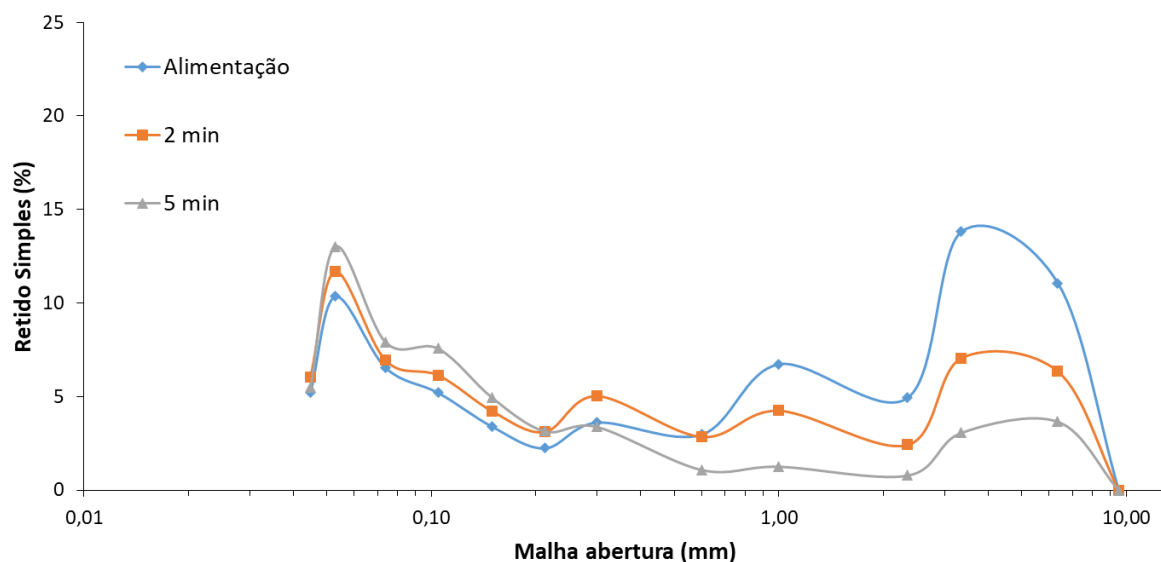
Foram realizados ensaios de moagem primária no Moinho 1 com *top size* 9,5 mm e 6,35 mm. As Figura 26 a Figura 29 mostram os resultados desses ensaios.

Figura 26 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e *top size* 9,5 mm



Fonte: Elaboração própria

Figura 27 - Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e *top size* 9,5 mm

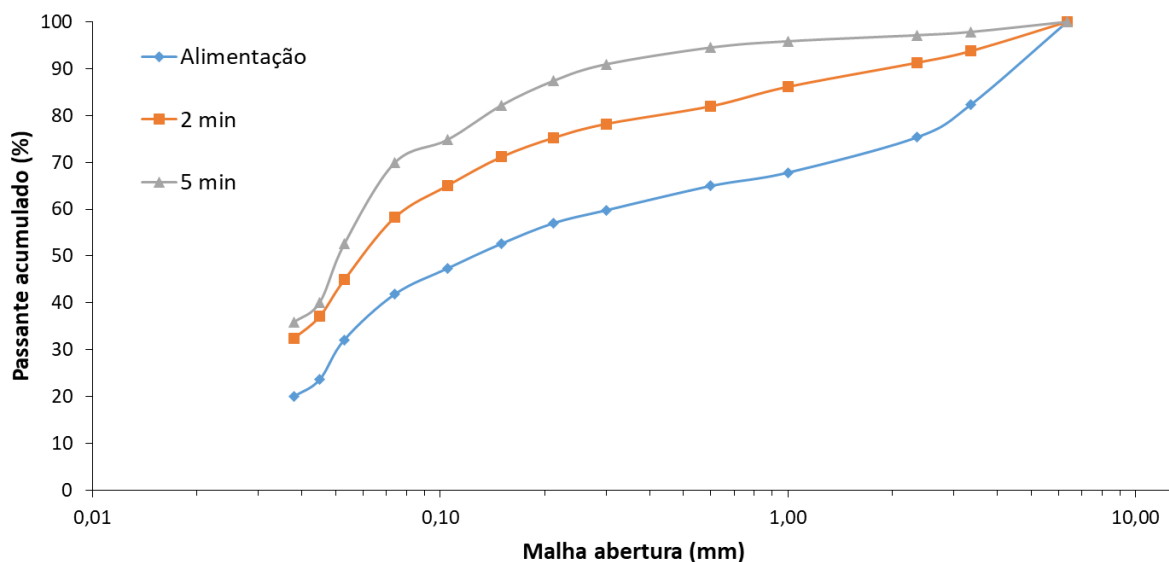


Fonte: Elaboração própria

As Figura 26 e Figura 27 mostram que o material com *top size* de 9,5 mm, apesar de abaixo do 12,5 mm da alimentação da moagem primária, ainda não sofreu o consumo das partículas mais grossas do minério alimentado.

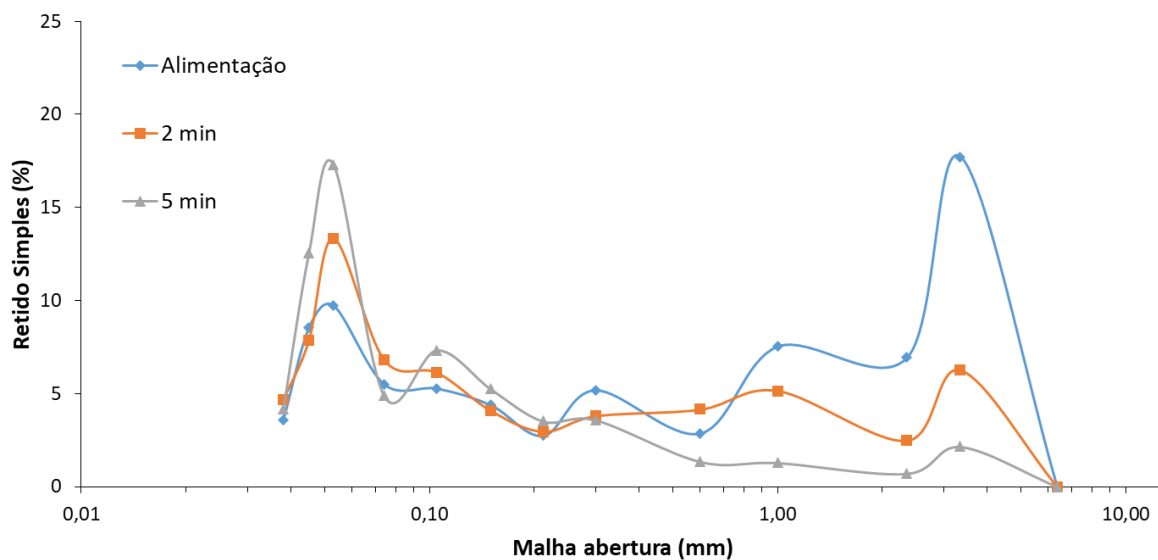


Figura 28 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e tosize 6,35 mm



Fonte: Elaboração própria

Figura 29 - Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 1 sem substituição e top size 6,35 mm

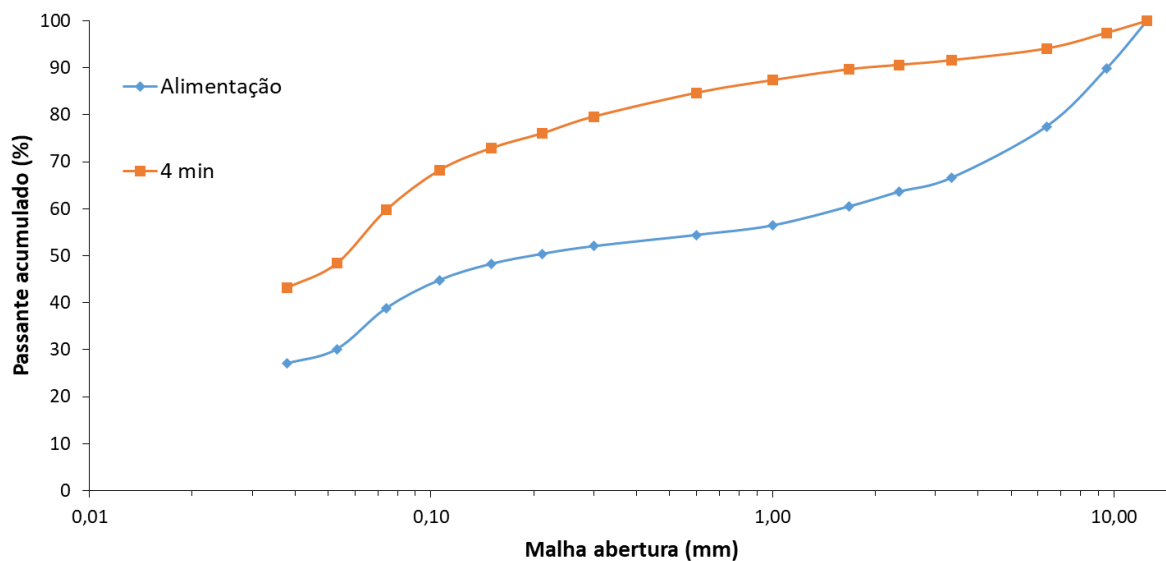


Fonte: Elaboração própria

As Figura 28 e Figura 29, resultados das moagens primárias no Moinho1 com top size de alimentação 6,35 mm, apresenta a maior quebra de partículas grossas das moagens primárias, corroborando o fato de que o Moinho 1 foi utilizado para esses ensaios considerando principalmente a maior facilidade de manuseio na realização das moagens.

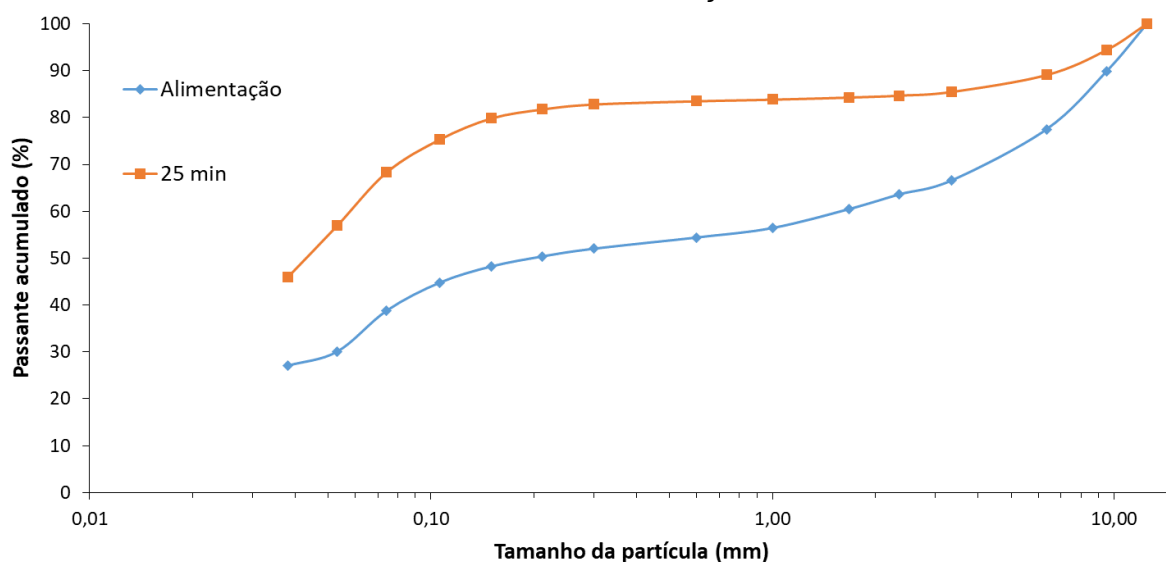
Os gráficos que mostram as curvas granulométricas das moagens primárias para o Moinho 2, estão representados nas Figura 30 e Figura 31.

Figura 30 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 2 com 0% de substituição



Fonte: Elaboração própria

Figura 31 - Distribuições granulométricas das moagens primárias no Moinho 2 com 100% de substituição

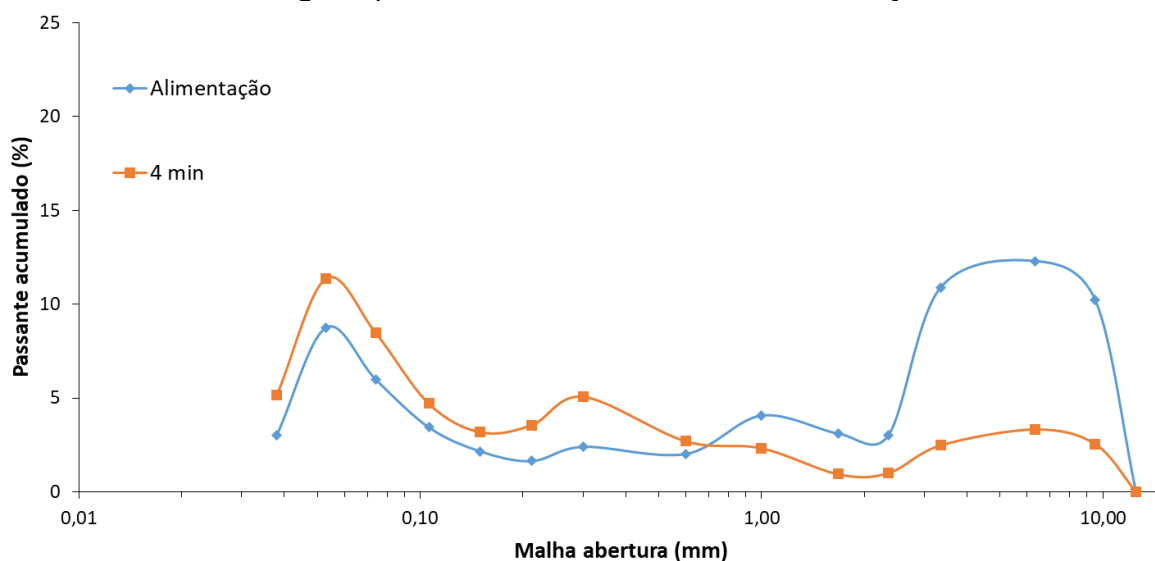


Fonte: Elaboração própria

Observa-se que na Figura 30 e na Figura 31 é possível notar novamente a curva bastante horizontal na sua parte central, porém com um pouco mais de inclinação

após os ensaios, ajudando nos cálculos do encontro do tempo necessário de moagem. A Figura 32 apresenta o gráfico de retido simples novamente.

Figura 32 - Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens primárias no Moinho 2 sem substituição.



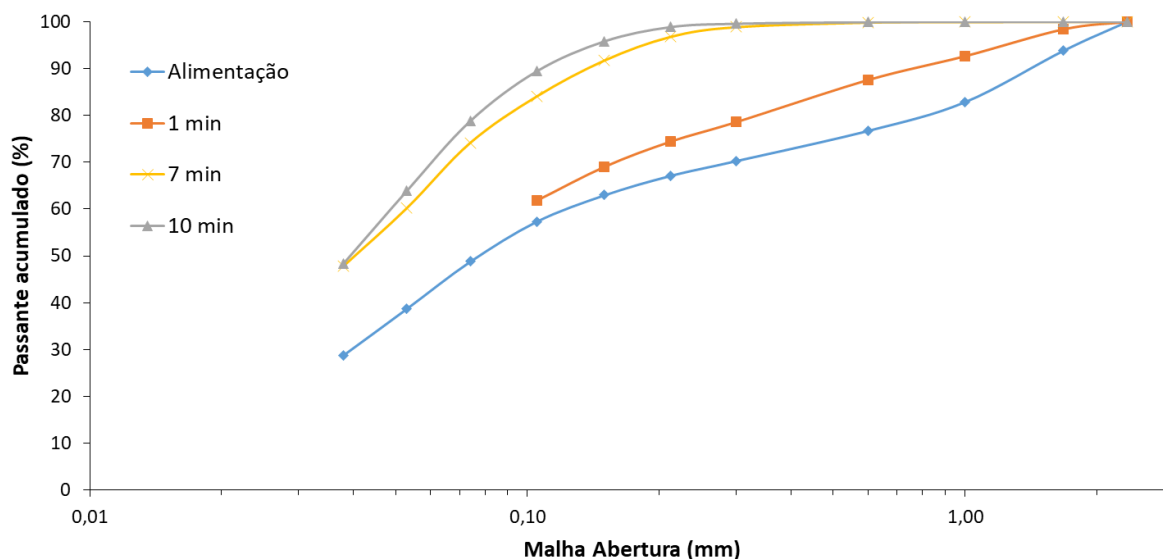
Fonte: Elaboração própria

A partir da Figura 32 fica evidente que com um moinho de maior diâmetro, as partículas grossas passaram a ser consumidas, diminuindo significativamente a característica bimodal da curva após o condicionamento da moagem.

Para as moagens secundárias foram feitas as mesmas compilações dos dados e análises. A Figura 33 apresenta a distribuição granulométrica das moagens secundárias realizadas no Moinho 1 com 100% do corpo moedor sendo bolas de aço.

Diferentemente das moagens primárias, a Figura 33 mostra que a faixa do gráfico referente à granulometria desejada (0,150 mm) se encontra em uma região das curvas menos horizontalizada, facilitando o encontro do tempo ideal de moagem. As malhas mais finas do ensaio foram desconsideradas por problemas técnicos, não interferindo nos resultados já que a malha de interesse 0,150 mm está presente.

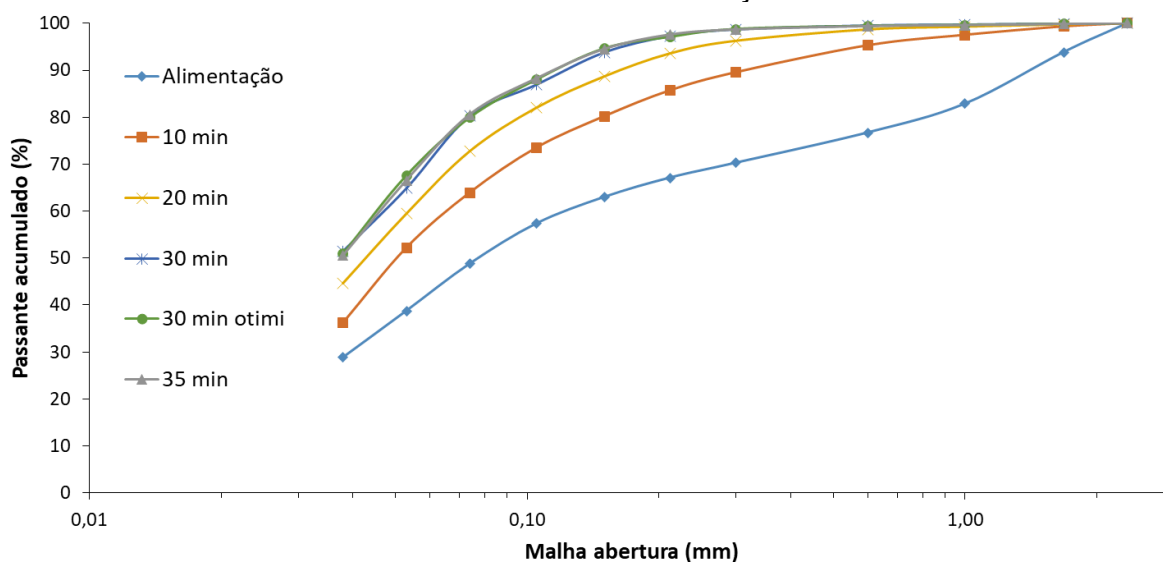
Figura 33 - Distribuições granulométricas das moagens secundárias no Moinho 1 com 0% de substituição



Fonte: Elaboração própria

A Figura 34 apresenta a curva granulométrica para os ensaios de moagem secundárias feitas no Moinho 1 com 100% de substituição.

Figura 34 - Distribuições granulométricas das moagens secundárias no Moinho 1 com 100% de substituição



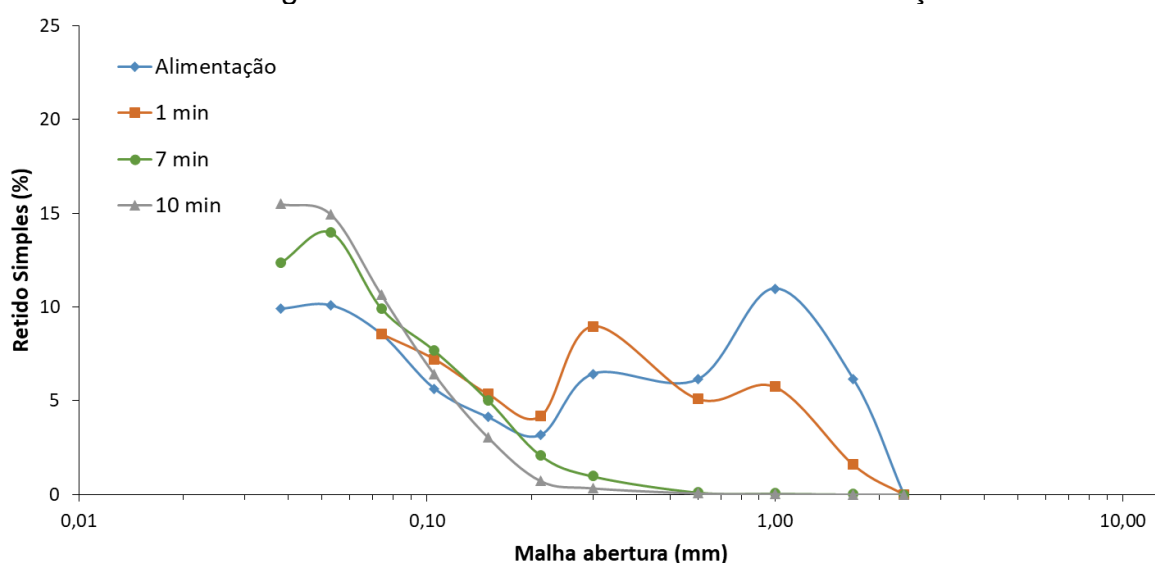
Fonte: Elaboração própria

Novamente na Figura 34 é observado o mesmo comportamento da Figura 33, ou seja, curva menos horizontalidade na faixa granulométrica desejada, facilitando o encontro do tempo ótimo de moagem. Além disto, pode-se observar que as curvas da condição

100% *pebbles* e 100% *pebbles* otimizados estão bastante sobrepostas, mostrando que com menos tempo de moagem, se os parâmetros estiverem ajustados com as condições consideradas ótimas para a moagem de *pebbles*, é possível chegar na mesma granulometria de produto com um menor consumo energético.

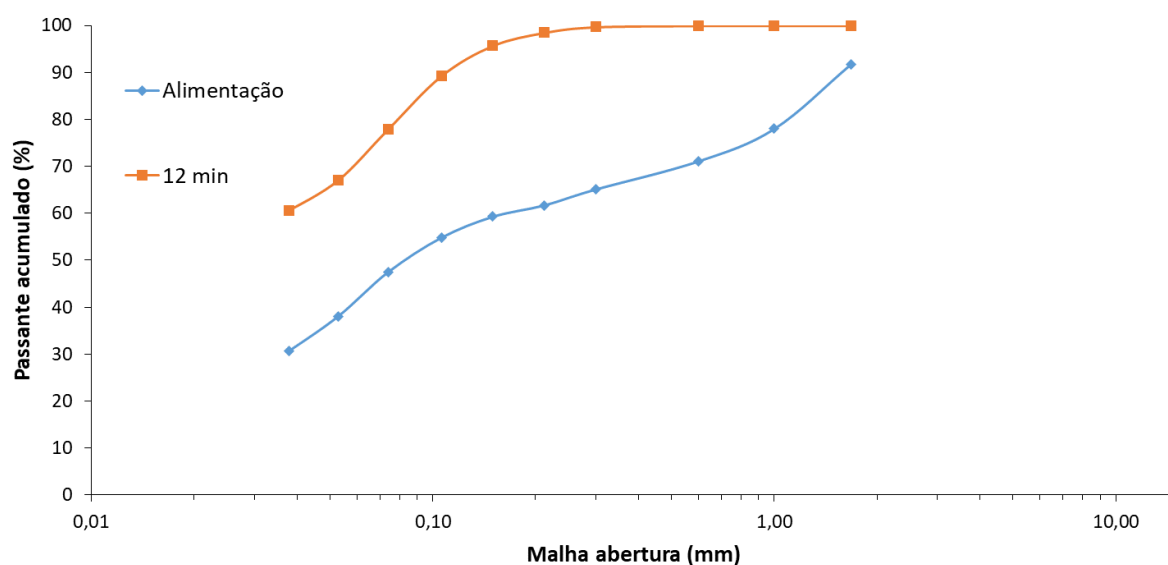
A Figura 35 ilustra o gráfico das moagens secundárias no Moinho 1. Como o *top size* da moagem secundária é menor (2,36 mm, comparado com 12,5 mm na moagem primária), é esperado que a curva de retido simples não tenha característica bimodal como acontece na Figura 25.

Figura 35 -Distribuições granulométricas com base em frações retidas simples das moagens secundárias no Moinho 1 sem substituição



A Figura 35 apresenta os dados esperados, ou seja, que as partículas mais grossas nos ensaios de moagem secundária, tivessem sido totalmente ou quase que totalmente consumidas. A Figura 36 apresenta a curva da moagem secundária sem substituição para o Moinho 2, onde pode-se observar o mesmo comportamento do moinho 1.

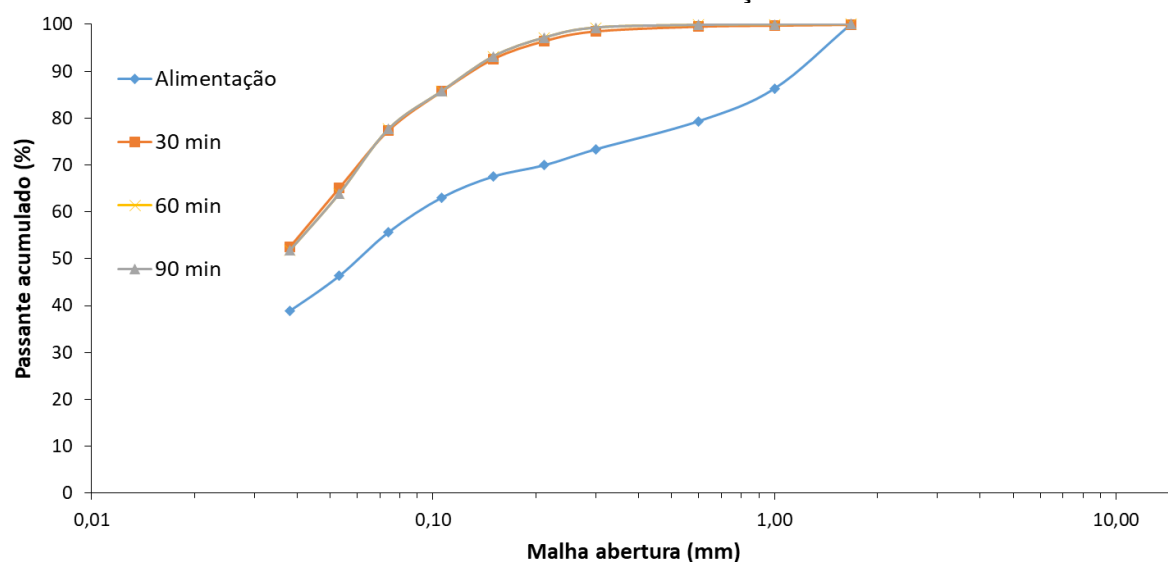
Figura 36 - Distribuição granulométrica da moagem secundária no Moinho 2 com 0% de substituição



Fonte: Elaboração própria

A Figura 37 mostra a distribuição granulométrica das moagens secundárias com 100% de substituição no Moinho 2. Cabe ressaltar que os tempos 60 e 90 minutos fazem parte do ensaio de análise do arredondamento dos *pebbles*, tendo sido renovada a carga de minérios em cada um desses tempos, o que explica a mesma distribuição granulométrica dos produtos em diferentes tempos.

Figura 37 - Distribuições granulométricas das moagens secundárias no Moinho 2 com 100% de substituição

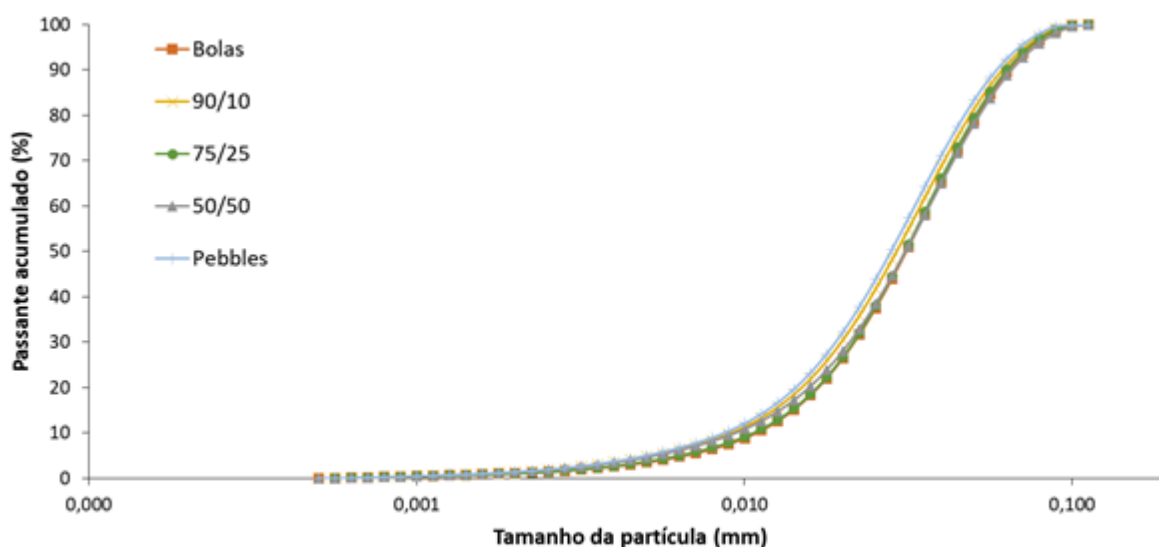


Fonte: Elaboração própria

A Figura 37, mostra conclusivamente que uma pequena alteração de distribuição granulométrica na carga moedora de *pebbles*, após diferentes tipos de moagem, não altera a granulometria do produto da moagem. Isso se deve ao fato do desgaste que ocorreu nos *pebbles* durante o ensaio de arredondamento, ter sido apenas para a perda das angulosidades do corpo moedor provocada por quebra por abrasão, alterando pouco a massa do *pebble* e, portanto, alterando pouco sua eficiência, como descrito na literatura (PILLAY; LOVEDAY, 2015).

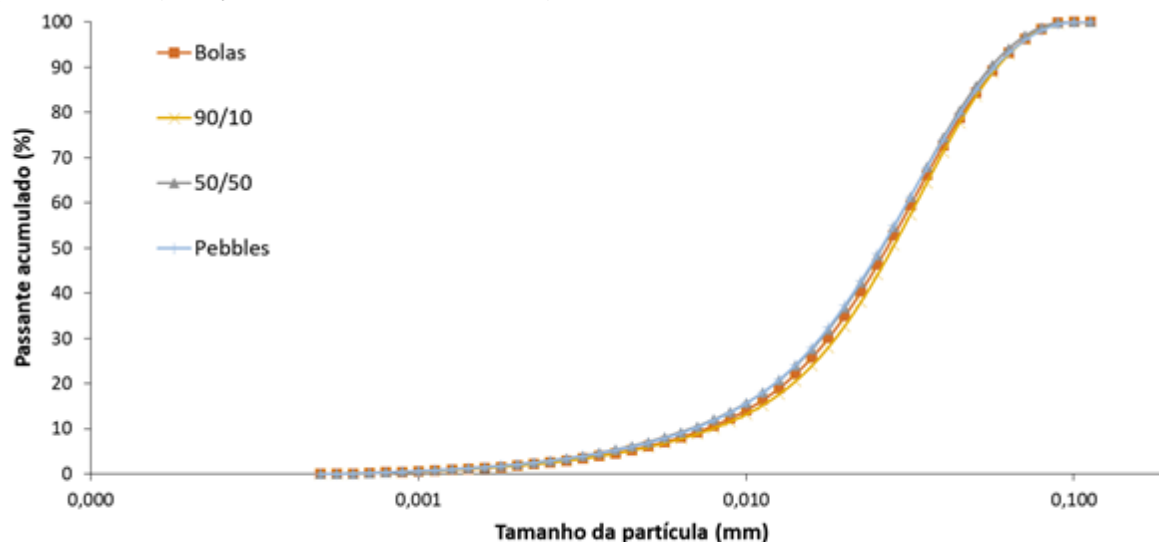
Quanto as análises granulométricas, outro fator importante no processamento de minério de ferro é a geração de lamas, que não pode ser intensa para não prejudicar a etapa de flotação. As Figura 38 e Figura 39 ilustram os resultados dos tamanhos de partículas realizados com a fração passante em 0,038 mm realizadas pelo método de espalhamento a laser, da moagem primária no Moinho 1 e na moagem secundária no Moinho 2.

Figura 38 - Análise granulométrica por espalhamento a laser para investigação de geração de lamas nas moagens primárias para  $P_{80} = 1 \text{ mm}$



Fonte: Elaboração própria com dados do LCT-USP

Figura 39 - Análise granulométrica por espalhamento a laser para investigação de geração de lamas nas moagens secundárias para  $P_{95} = 0,150$  mm



Fonte: Elaboração própria com dados do LCT-USP

Observa-se nas Figura 38 e Figura 39 que não há grandes diferenças na geração de lamas entre as condições ensaiadas. A moagem que utilizou 100% de *pebbles* como corpos moedores conta com maior quantidade de lamas que os demais ensaios em ambos os casos, porém, do caso base sem substituição, ou seja, 100% bolas de aço, para o caso com 100% *pebbles*, a porcentagem de passante acumulado na malha 0,010 mm passou de cerca de 8,85% para cerca de 12,10% na moagem primária. Na moagem secundária essa diferença é ainda menor, de 14,11% para 15,63%. Esses resultados indicam que a substituição parcial de corpos moedores praticadas nos ensaios não apresentaram efeitos negativos significativos quanto à geração de lamas. Os laudos de tais ensaios estão presentes no ANEXO F.

Após todas as análises granulométricas, pôde-se fazer a análise energética dos resultados, a partir dos dados de medição de energia dos ensaios. As Tabela 7 e Tabela 8 apresentam, respectivamente, os dados energéticos dos ensaios de moagem primária e moagem secundária. Os dados de torque utilizados nas equações foram analisados como os presentes no APÊNDICE G. Dois resultados comparativos também estão apresentados: o cálculo da Energia específica pela fórmula de Rowland e o cálculo da Energia específica com a fórmula que utiliza os dados do torque, porém, com dados da massa de minério da saída da moagem abaixo de 12,5 mm na primária e abaixo de 2,35 mm na secundária.



Tabela 7 - Dados energéticos das moagens primárias

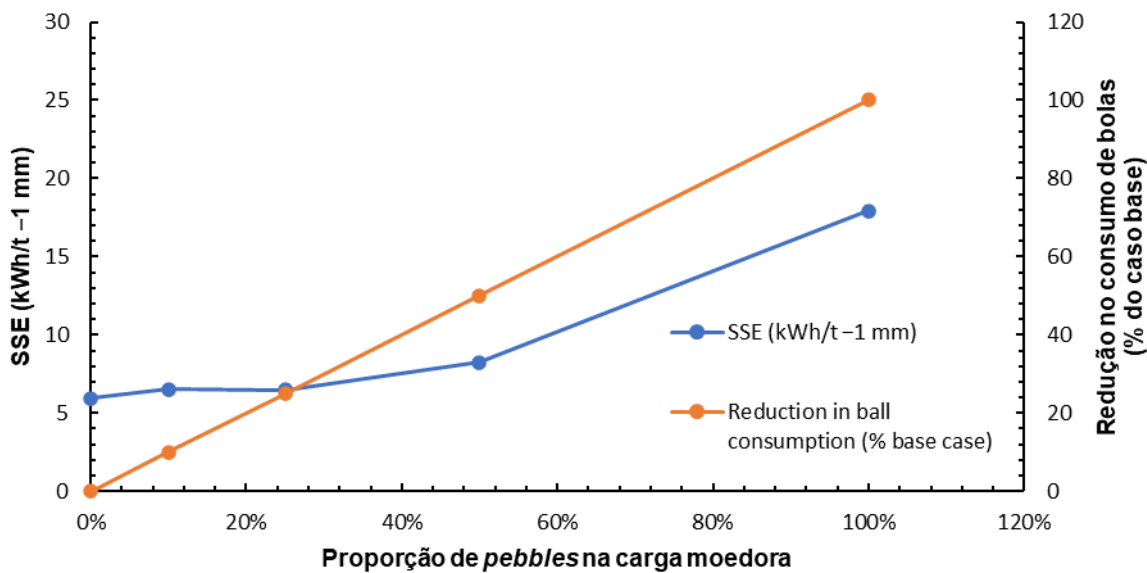
Proporção de <i>pebbles</i> na carga	Moinho 1					Moinho 2			
	0%	10%	25%	50%	100%	0%	25%	50%	100%
Tempo de moagem	3min 30 seg	3 min 40 seg	4 min	6 min	20 min	4 min	5 min	5 min	25 min
P80 (mm)	0,7	1,0	1,0	0,6	0,8	0,3	0,4	1,0	0,2
Energia específica torque (kWh/t)	1,36	1,46	1,49	2,03	5,01	1,60	1,83	1,70	5,94
Consumo energético E (% do caso base)	-	+7,4	+9,5	+49,2	+268	-	+14,4	+6,3	+271
Energia específica Rowland (kWh/t)	1,60	1,59	1,58	2,00	4,17	1,49	1,61	1,36	4,25
Energia específica torque – massa de saída (kWh/t)	1,36	1,44	1,45	1,91	4,01	-	-	-	-
SSE (kWh/t -1 mm)	5,94	6,51	6,50	8,24	17,94	5,16	6,49	7,23	21,68
Consumo energético SSE (% do caso base)	-	+9,5	+9,4	+38,7	+202,0	-	+25,7	+40,11	320,1
Consumo de <i>pebbles</i> (% do produto)	-	10,1	5,9	14,1	38,2	-	10,2	16,3	31,9
Consumo de bolas (% do caso base)	-	-10%	-25%	-50%	-100%	-	-25%	-50%	-100%

Tabela 8 - Dados energéticos das moagens secundárias

Proporção de <i>pebbles</i> na carga	Moinho 1					Moinho 2			
	0%	10%	50%	100%	100% ot.	0%	25%	50%	100%
Tempo de moagem	10 min	11 min 30 sec	20 min	35 min	30 min	12 min	16 min	25 min	30 min
P95 (mm)	0,14	0,14	0,14	0,16	0,16	0,14	0,14	0,14	0,18
Energia específica torque (kWh/t)	3,82	4,28	6,78	9,41	8,25	5,39	5,43	7,53	7,10
Consumo energético E (% do caso base)	-	+12,0	+77,5	+146,3	+116,0	-	+0,7	+39,7	+31,7
Energia específica Rowland (kWh/t)	4,58	4,98	6,67	7,30	7,02	4,48	5,16	6,79	5,10
Energia específica torque – massa de saída (kWh/t)	3,82	4,22	6,14	7,94	6,78	4,48	5,03	6,00	5,39
SSE (kWh/t – 0,150 mm)	11,64	12,69	18,54	25,20	21,44	19,12	19,24	26,29	28,18
Consumo energético SSE (% do caso base)	-	+9,0	+59,3	+116,5	+84,2	-	+0,6	+37,5	+47,4
Consumo de <i>pebbles</i> (% do produto)	-	1,9	19,8	46,1	44,1	-	7,7	22,7	27,6
Consumo de bolas (% do caso base)	-	-10%	-50%	-100%	-100%	-	-25%	-50%	-100%

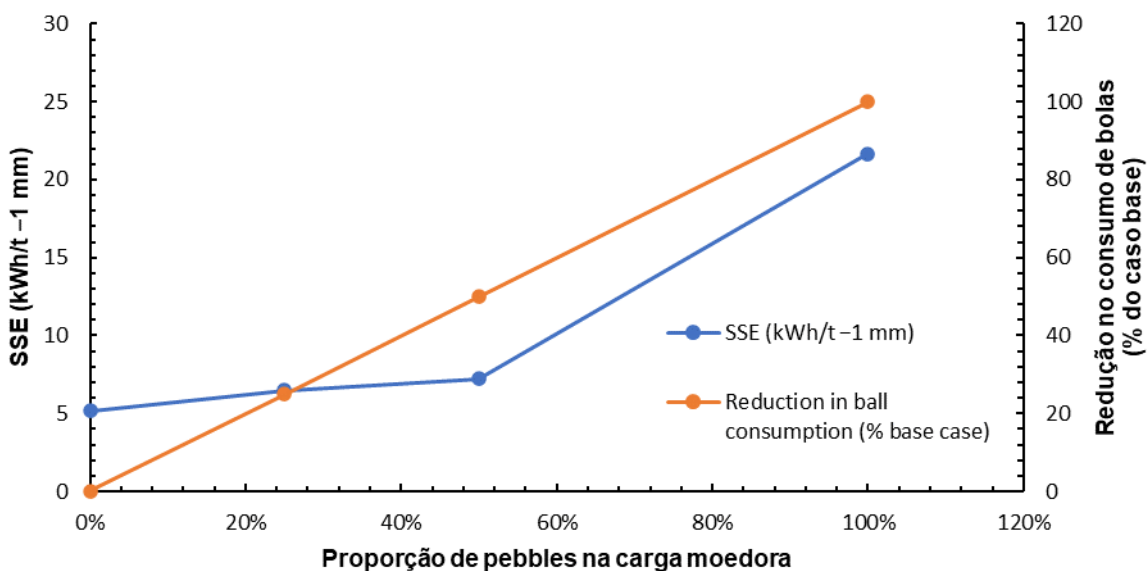
As Figura 40 a Figura 43 apresentam gráficos dos dados de SSE e redução no consumo de bolas de aço de acordo com a proporção de *pebbles* na carga.

Figura 40 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem primária no Moinho 1



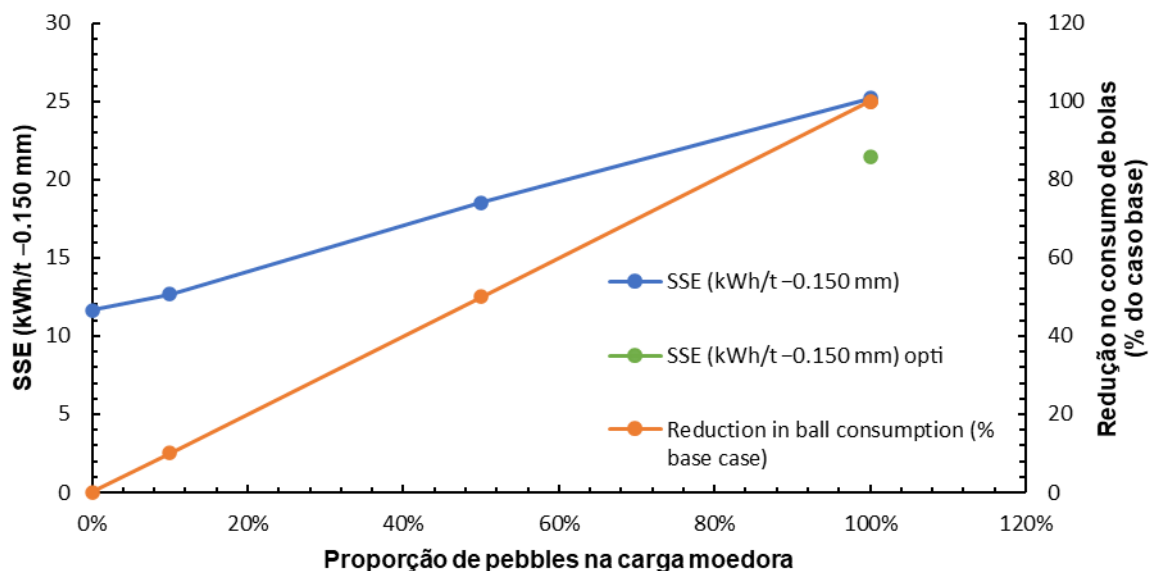
Fonte: Elaboração própria

Figura 41 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem secundária no Moinho 1



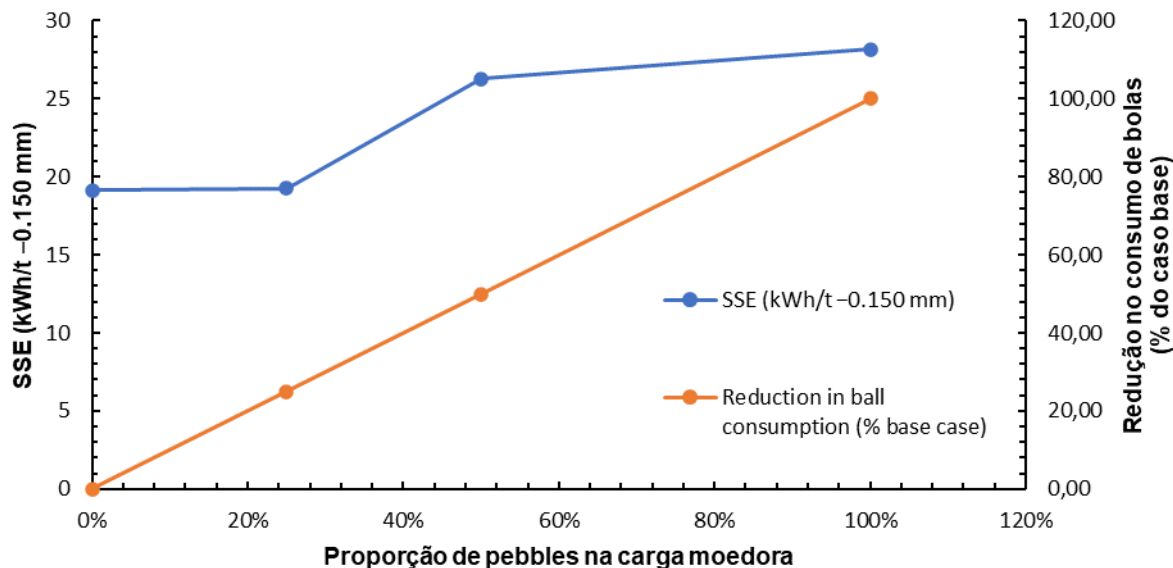
Fonte: Elaboração própria

Figura 42 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem primária no Moinho 2



Fonte: Elaboração própria

Figura 43 - Progressão da SSE e da redução do consumo de bolas na moagem secundária no Moinho 2



Fonte: Elaboração própria

Nota-se, pelas Tabela 7 e Tabela 8 e pelas Figura 40 a Figura 43, que em todas as condições de moagem, que conforme é aumentada a substituição de corpos moedores metálicos por *pebbles*, o consumo de *pebbles*, o consumo de energia específica e a SSE aumentam progressivamente, de maneira diretamente proporcional.

Pelas Tabela 7 e Tabela 8 também, quando analisados os valores de  $P_{80}$  e  $P_{95}$ , é notória a maior dificuldade na moagem primária de chegar na granulometria requerida. Cabe ressaltar o caso da moagem primária no Moinho 2 que, além de contar com uma curva granulométrica bastante horizontalizada (como mostra a Figura 30, por exemplo), trata-se também de um ensaio que requer uma massa muito grande de material e bastante dificuldade de manuseio, impedindo a realização de um número de moagens suficientes para prever o tempo para atingir a granulometria requerida. Sendo assim, os dados de  $P_{80}$  da moagem primária no Moinho 2 são bastante distintos. Em contrapartida, todos os ensaios de moagem secundária possuem  $P_{95}$  muito próximos ao esperado.

Observando os resultados da moagem primária na Tabela 7, e considerando o aumento progressivo do consumo energético de acordo com o aumento da substituição, fica evidente que o aumento mais significativo das energias foi na moagem onde 100% dos corpos moedores metálicos fora substituído por *pebbles*. No Moinho 1, comparando o ensaio de corpos moedores apenas metálicos com as substituições, os dois melhores cenários são 10% e 25% de substituição, pois possuem acréscimo de apenas 7,4% e 9,5% na energia específica, respectivamente, e de 9,5% e 9,4% na SSE, mesmo havendo economia significativa de bolas de aço. Dentre esses dois, vale destacar o cenário de substituição de 25%, portanto, devido à maior economia de bolas de aço para o mesmo aumento de SSE em relação ao caso base. Já no Moinho 2, ainda sobre a moagem primária, apesar das condições possuírem granulometrias de saída distintas, é possível observar que o ensaio com substituição de 25% indica um bom resultado, porque mesmo tendo atingido uma granulometria mais fina que o de 50% de substituição (e a granulometria requerida), ainda possui SSE comparativa com caso base menor que aquela, ou seja, com menor SSE é possível chegar em faixas granulométricas de saída mais finas com esta porcentagem de substituição. Além disto, o consumo de *pebbles* em relação ao produto são os menores, em ambos os moinhos, nas condições de substituição de 25%. Os cálculos feitos pelo método de Rowland, usando a Equação (3), confirmam que os cálculos de energia feitos a partir da medição de torque são consistentes, já que os resultados mostram ordem de grandeza de consumo energético bastante parecida. Já os cálculos feitos com a massa de minério da saída do ensaio, ou seja, considerando a massa de *pebbles* consumida e transformada em produto, mostra que

deve ser mantida a atenção de qual valor de massa está sendo usado nos cálculos de ensaios realizados em batelada quando foram prever dados industriais contínuos.

Na moagem secundária, com dados apresentados na Tabela 8, é possível analisar que as condições com 10% e 25% de substituição são as que possuem menores acréscimos de energia em relação ao caso base, assim como na moagem primária. Considerando o Moinho 1, a condição com 10% de substituição se sobressai às demais com acréscimo de apenas 12% na energia específica e 9% na SSE, sendo que a condição mais próxima (50% de substituição) possui acréscimo de 146% e 116%, respectivamente, quanto às energias. Outro fator importante a ser notado dos ensaios neste moinho, é sobre a moagem com 100% de substituição com condições otimizada para moagem de *pebbles*, que produziu material com a mesma granulometria que o 100% de substituição, mas com 5 minutos a menos de moagem, o que equivaleu a 12% a menos de consumo energético, alterando apenas a diluição da polpa e a velocidade de rotação do ensaio. Isto corrobora que existem fatores importantes a serem observados na otimização para moagens utilizando *pebbles* como corpos moedores.

Nas moagens secundárias realizadas no Moinho 2, o acréscimo de energia na condição de 25% de substituição é de 0,7%, ou seja, um valor muito baixo de energia consumida a mais para gerar um produto na mesma granulometria, com 25% de economia de corpos moedores. Isso se repete na análise dos dados da SSE.

Nas moagens secundárias em ambos os moinhos, o que se observa sobre o consumo de *pebbles* é que se trata de um aumento mais constante entre as condições do que na moagem primária. Isso pode ser explicado pela junção de dois fatores: o primeiro ponto é que as cargas de *pebbles* foram preparadas peneirando-se o material entre 63,5 e 25,4 mm e quarteando-se tal produto em diferentes alíquotas. Isto pode resultar em pequenas diferenças entre as distribuições granulométricas da carga de cada ensaio. O segundo ponto é que as cargas de *pebbles* dos moinhos 1 e 2 foram compostas com amostras de diferentes lotes. Apesar da caracterização realizada nos dois lotes indicar que as amostras são semelhantes, pequenas diferenças nas características das mesmas podem levar aos resultados observados nas duas escalas. Ressalta-se, no entanto, que tais diferenças não são significativas e

consideradas adequadas para a escala laboratorial do presente estudo. Este é um dos aspectos da substituição por *pebbles* que deve ser avaliado em detalhes em uma operação piloto.

O aumento do consumo de energia, que acompanhou as substituições progressivas da carga de bolas de aço por *pebbles*, pode ser atribuído tanto à menor densidade como a forma destes em relação a aqueles (CROCKER, 1985; ROWLAND, 1982). É interessante notar também que os incrementos de energia necessária entre as moagens foram significativamente menores para a moagem secundária em relação à primária. Neste caso, o desgaste abrasivo dos *pebbles* pode ter favorecido a geração de frações finas no produto, conforme malha de controle da moagem secundária.

Quanto ao consumo dos *pebbles* como corpos moedores, segundo Crocker (1985), a faixa de consumo de *pebbles* em relação ao produto para moagem com 100% de *pebbles* é de 2,6 a 6% em minérios tenazes. Já Nkwanyana e Loveday (NKWANYANA; LOVEDAY, 2017, 2018) realizaram ensaios com carga moedora mista (*pebbles* com bolas), com resultados de consumo de *pebbles* em moinho análogo ao Moinho 2, na faixa de 6 a 16%. Com base nestes dados e nos resultados apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8, foi considerado para o presente trabalho, o consumo de corpos moedores máximo aceito como 10%, confirmando as melhores para estudos futuros a que contempla 25% de substituição.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a possibilidade de substituição parcial das esferas de aço em um moinho de bolas convencional por *pebbles* provindos da etapa de britagem. Ensaios de caracterização mostraram que as propriedades do itabirito compacto favorecem seu uso como meio de moagem. Além disso, alguns resultados mostraram que o itabirito compacto, cujo percentual deve aumentar no beneficiamento da usina, tem abrasividade muito maior do que o itabirito friável, material que tende a ser menos processado. Esse resultado pode acarretar problemas futuros com o consumo de corpos moedores metálicos, além de aumentar o custo operacional. Os resultados do *Tumbling* estão de acordo com o teste de arredondamento, corroborando assim as propriedades promissoras do itabirito compacto como meio de moagem.

Ensaios de moagem mostraram que a substituição parcial das bolas de aço, como uma carga mista, usando 25% de *pebbles*, pode trazer resultados positivos quando comparado ao uso apenas de bolas e ou apenas *pebbles* como corpo moedor. Além disso, os ensaios com moinho em escala laboratorial de maior diâmetro não indicaram maior desgaste dos *pebbles* como corpo moedor, o que sustenta a conclusão da decisão sobre o uso de meios de moagem mistos. O consumo de energia durante os ensaios mostrou que as substituições parciais de 10% e 25% apresentaram valores de consumo de energia muito próximos ao caso base. Portanto, essas razões de substituição devem despertar interesse em estudos econômicos futuros para reduzir o consumo de bolas de aço em circuitos de moagem de itabiritos.



## 6 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Por se tratar de uma pesquisa de mestrado, as limitações de tempo e financeira impossibilitaram que todos os estudos necessários para a completa avaliação da rota proposta fossem realizados. Sendo assim, cabe neste tópico fazer sugestões para estudos futuros em continuidade a este:

- a) Realizar ensaios em escala laboratorial com os *pebbles* tendo sido divididos em diferentes faixas de tamanho, de maneira a simular com maior acurácia a distribuição granulométrica inicial dos *pebbles*;
- b) Realizar ensaios em escala maior como, por exemplo, em escala piloto, de maneira a observar com mais profundidade o comportamento dos *pebbles* quando utilizados em carga moedora mista junto com as bolas de aço;
- c) Realizar o cálculo das funções quebra e seleção, para poder avaliar em mais detalhes o impacto das diferentes composições de corpos moedores;
- d) Realizar a modelagem matemática e simulações em software de simulação de processos minerais. É importante que o software possua modelos adequados para simular a moagem com *pebbles*.

Cabe destacar aqui uma citação de Bruno Latour: "O objetivo da ciência não é produzir verdades indiscutíveis, mas discutíveis".

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Informe Mineral - 2º semestre**. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br>>
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas**. Brasília, 2020. Disponível em: <[www.anm.gov.br](http://www.anm.gov.br)>
- ALVES, V. K.; SCHNEIDER, C. L. **Application of the Anaconda simplified Work Index for multiple test sizes**. XXV IMPC. **Anais**. Brisbane: 2010.
- ARAUJO, A. C. et al. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. <http://dx.doi.org/10.1179/037195503225011439>, v. 112, n. APRIL, 2013.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Norme Française P18-579 - Granulats — Détermination des coefficients d'abrasivité et de broyabilité**. Saint-Denis, 2013.
- AUSTIN, L. G.; KLIMPLEL, R. R.; LUCKIE, P. T. **Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling**. New York: SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1984.
- BALLANTYNE, G. **Quantifying the additional energy consumed by ancillary equipment and embodied in grinding media in comminution circuits**. SAG Conference. **Anais**...Vancouver: 2019.
- BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1987.
- BERGSTROM, B. H. Abrasiveness. Em: **SME Mineral Processing Handbook**. New York: SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1985. p. 30–70.
- BOND, F. C. The third theory of comminution. **Mining Engineering**, v. 193, n. October 1951, p. 484–494, 1952.
- BUENO, M. et al. The double wheel breakage test. **Minerals Engineering**, v. 168, n. June 2020, p. 1–12, 2021.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios v.4 A flotação no Brasil**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios v.3 Britagem, peneiramento e moagem**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CHIEREGATI, A. C. **Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2001.

- COCHILCO. **Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Analisis Mercado de los Insumos Críticos 2017 \(empresas\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Analisis Mercado de los Insumos Críticos 2017 (empresas).pdf)>.
- CROCKER, B. S. Pebble Mills. Em: WEISS, N. L. (Ed.). **SME Mineral Processing Handbook.** 1. ed. New York: SME, 1985. v. 1p. 3C94-3C107.
- DELBONI JR, H.; CHIEREGATI, A. C.; BERGERMAN, M. G. **Development and validation of ore characterisation test and its use in variability campaigns of comminution circuits.** XXV Internacional Mineral Processing Congress. **Anais.** Brisbane: 2010. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/350823963>>
- DELBONI JUNIOR, H. Cominuição. Em: **Tendências Tecnológicas Brasil 2015.** 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2007.
- DELBONI JUNIOR, H. **Aulas da disciplina PMI3323 - Tratamento de Minérios: Cominuição e Classificação.** São Paulo Curso de Engenharia de Minas EPUSP, , 2015.
- DONDA, J. D. **Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinho de bolas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- DONDA, J. D.; ROSA, A. C. **A Lei da Moagem - Comprovação para minério de ferro.** 1. ed. Ouro Preto: L&E Graphar, 2014.
- DORR, J. V. N. Supergene iron ores of minas Gerais, Brazil. **Economic Geology**, v. 59, n. 7, p. 1203–1240, 1964.
- DORR, J. V. N. **Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilatero Ferrifero Minas Gerais, Brazil.** Washington: United States Government Printing Office, 1969.
- DOWLING, E. C. et al. **Application of high-pressure grinding rolls in an autogenous pebble milling circuit.** SAG Conference. **Anais.** Vancouver: 2001.
- FERREIRA, K. C. et al. Efeito do escalpe no Work Index de Bond. **Holos**, v. 7, p. 59, 2015.
- FREITAS, L. S. **Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco Mineração S/A.** Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- GERMANY, D. J. **A mineração no Brasil.** Rio de Janeiro, 2002.

- HAHNE, R.; PALSSON, B. I.; SAMSKOG, P. O. **Abrasion tests on iron ore evaluated by multivariate statistics**. SAG Conference. **Anais...Vancouver**: 2001.
- HESTER, K. E. N.; ARTHUR, B. Pebble mill circuits. **CIM Special**, v. 40, p. 19, 1989.
- JAMES, H. L. Sedimentary facies of iron-formation. **Economic Geology** **49**, p. 235–393, 1954.
- JULIACI, T. S.; MAZZINGHY, D. B.; BERGERMAN, M. G. É possível usar o método de Bond para avaliar o desempenho energético de circuitos de moagem semi-autógena (SAG). **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, p. 1–8, 2019.
- KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. John Wiley and Sons, New York, NY, 1 jan. 1982.
- KOIVISTOINEN, P. et al. **A comminution cost comparison of traditional metallic grinding, semiautogeneous grinding (SAG) and two-stage autogeneous grinding**. SAG Conference. **Anais...Vancouver**: 1989.
- KOJOVIC, T. **HIT - a Portable Field Device for Rapid Testing at Site**. AUSIMM Mill Operators' Conference. **Anais...Perth**: AUSIMM, 2016.
- LAMECK, N. N. S. **Effects of grinding media shapes on ball mill performance**. Dissertation of Master, University of the Witwatersrand, 2005.
- LIMA, N. P. et al. The entrainment effect on the performance of iron ore reverse flotation. **Minerals Engineering**, v. 96–97, p. 53–58, 1 out. 2016.
- LOVEDAY, B. The small pebble process for reducing ball and power consumption in secondary grinding. **XXV IMPC**, v. 2, n. September, p. 981–989, 2010.
- LOVEDAY, B. K. **The Use of Small Pebbles for Secondary Grinding**. SAG Conference. **Anais**.2001.
- LUZ, A. B. DA; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2010.
- LYNCH, A. J. **Comminution Handbook**. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015.
- MARJLUND, U.; OJA, J. **Grinding control AITIK: Optimisation of an autogenous grinding circuit through mill filling measurement and multivariate statistical analysis**. SAG Conference. **Anais**. Vancouver: 1996.
- MARKSTROM, S. **Commissioning and operation of the AG mills at the AITIK Expansion project**. SAG Conference. **Anais**. Vancouver: 2011.

- MAZZINGHY, D. B.; RUSSO, J. F. C.; PIMENTEL, D. A. **Avaliação dos parâmetros cinéticos de moagem para amostras de itabiritos compacto e friável**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. **Anais...**Goiânia: 2013.
- MAZZINGHY, D. B.; RUSSO, J. F. C.; PIMENTEL, D. A. Parâmetros cinéticos de moagem de itabiritos compacto e friável. **HOLOS**, v. 3, p. 158, 3 jul. 2014.
- MCIVOR, R. E. **Determining the Bond Efficiency of industrial grinding circuits**. Global Mining Guidelines Group, 2015. Disponível em: <<http://www.gmggroup.org>>
- MORRELL, S. Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples. **Minerals Engineering**, v. 17, n. 3, p. 447–451, mar. 2004.
- NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation**. First Edition ed. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.
- NKWANYANA, S. G. **An exploration of the benefits of using a mixture of critical size pebbles (from semi-autogenous mill) and steel balls in secondary milling**. Thesis of Doctor—[s.l.] University of Kwazulu-Natal, 2021.
- NKWANYANA, S.; LOVEDAY, B. Addition of pebbles to a ball-mill to improve grinding efficiency. **Minerals Engineering**, v. 103–104, p. 72–77, 2017.
- NKWANYANA, S.; LOVEDAY, B. Addition of pebbles to a ball-mill to improve grinding efficiency – Part 2. **Minerals Engineering**, v. 128, n. May, p. 115–122, 2018.
- NORGAARD, S. Laboratory Test Work and Equipament. Em: R. C. DUNNE; S. K. KAWATRA; C. A. YOUNG (Eds.). **SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook**. Perth: SME, 2019. p. 115–145.
- OVERTON, C. W.; SMITH, J. W.; LOWE, E. A. Pebble grinding at Bethlehem Copper Corporation. **Canadian Mining Journal**, v. 96, n. 9, p. 323–336, 1975.
- PAUW, O. G. et al. The control of pebble mills at Buffelsfontein Gold Mine by use of a multi variable peak-seeking controller. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall**, v. 85, n. 3, p. 89–96, 1985.
- PEREIRA LIMA, N.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Effect of particles size range on iron ore flotation *Mineração Mining*. v. 66, n. 2, p. 251–256, 2013.
- PERES, L. DE M.; MASSOLA, C. P.; BERGERMAN, M. G. Abrasiveness Evaluation of Pre-Concentration of Copper Sulfide Ore Products Through LCPC Test. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 15, n. 2, p. 91–95, 2018.

- PILLAY, T.; LOVEDAY, B. **Optimization of pebble milling**. SAG Conference. **Anais**. Vancouver: 2015.
- PINTO, P. F.; DELBONI JR, H. Comminution Circuits for Compact Itabirites. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 3, p. 355–359, 2016.
- PINTO, P. H. F. **Desenvolvimento de rotas para cominuição de itabiritos compactos do quadrilátero ferrífero**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2016.
- PINTO, R. P. et al. Caracterização de Amostras de Minério de Ferro do Complexo Vargem Grande. **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, 2019.
- POWELL, M. S. et al. **LKAB Autogenous milling of magnetite**. SAG Conference. **Anais**...Vancouver: 2011.
- RIBEIRO, É. DE Q. **Caracterização Tecnológica do Itabirito Pobre Compacto - “IPC” da Mina Casa de Pedra**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- ROSA, A. C.; OLIVEIRA, P. S. DE; DONDA, J. D. **Comparing ball and vertical mills performance: An industrial case study**. XXVII IMPC. **Anais**...Santiago: 2014.
- ROWLAND, C. A. Selection Of Rod Mills, Ball Mills, Pebble Mills And Regrind Mills. Em: MULAR, A. L.; JERGENSEN, II, G. V. (Eds.). **Design and Installation of Comminution Circuits**. New York: The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1982. p. 239–439.
- ROWLAND, C. A. Selection of Rod Mills, Ball Mills and Regrind Mills. Em: MULAR, A. L.; HALBE, D. N.; BARRATT, D. J. (Eds.). **Mineral Processing Plant Design, Practice and Control V.1**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 2002. p. 733–735.
- SAMPAIO, J. AL. et al. **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**., 2001.
- SHAHBAZI, B. et al. Study on the impacts of media shapes on the performance of tumbling mills – A review. **Minerals Engineering**, v. 157, n. March 2019, p. 106490, 2020.
- SOUTO MC. **Caça e Caçadora**., 2019.
- SOUZA, N. A. F. DE. **Análise crítica de rotas de processamento de minérios de Ferro itabiríticos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- TAVARES, L. M. M. et al. On the design of ball mills for grinding itabirite ores. **6th Int. Congress on the Science and Technology of Iron making**, v. 2, p. 742–752, 2012.

THURO, K. et al. **Determining abrasivity with the LCPC test**. 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. **Anais...**2007.

TURRER, H. D. G. et al. **Avaliação do consumo energético na moagem de dois diferentes tipos litológicos do depósito da Serra do Sapo**. 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. **Anais...**2014.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2020**. **U.S Department OF The Interior, U.S Geological Survey**. Reston, 2020. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>>

VALCÁRCEL, H. B. **Correlación empírica para la evaluación de consumos de bolas en aplicaciones de molienda**. X Simposium Sobre Procesamiento De Minerales. **Anais...**Nevados de Chillán: 2005.

YAHYAEI, M. et al. **Improving liner design for efficiency**. SAG Conference. **Anais**. Vancouver: 2015.

## APÊNDICES



## APÊNDICE A - Resultados da análise granulométrica da amostra cabeça

### Tabela A.1. Resultados dos peneiramentos com a amostra cabeça – Lote 1

		Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais							
		Friable Itabirite		Compact Itabirite		Retido acumulado IF (%)		Retido acumulado IC (%)	
Malha (Tyler)	Abertura (mm)	Peso retido IF (kg)	Peso retido IC (kg)	Peso retido IF (%)	Peso retido IC (%)	Passante acumulado IF (%)	Passante acumulado IC (%)	Retido acumulado IF (%)	Retido acumulado IC (%)
	152,40	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00	0,00
	127,00	0,00	3,40	0,00	3,14	100,00	96,86	0,00	3,14
	101,60	0,00	9,96	0,00	9,19	100,00	87,67	0,00	12,33
	76,20	0,00	9,82	0,00	9,06	100,00	78,61	0,00	21,39
	63,50	0,00	8,36	0,00	7,72	100,00	70,89	0,00	29,11
	50,80	0,40	10,48	0,84	9,67	99,16	61,22	0,84	38,78
	37,50	0,31	14,30	0,64	13,20	98,53	48,02	1,47	51,98
	25,40	1,03	12,80	2,13	11,81	96,40	36,21	3,60	63,79
	19,10	1,22	6,06	2,53	5,59	93,86	30,62	6,14	69,38
	12,70	1,44	7,10	2,99	6,55	90,88	24,07	9,12	75,93
	9,50	1,16	2,46	2,41	2,27	88,46	21,80	11,54	78,20
	6,35	2,51	2,92	5,21	2,69	83,25	19,10	16,75	80,90
	4,75	0,90	1,72	1,87	1,59	81,38	17,52	18,62	82,48
	3,35	1,49	1,52	3,10	1,40	78,28	16,11	21,72	83,89
	2,36	1,23	1,16	2,55	1,07	75,73	15,04	24,27	84,96
	1,68	0,76	0,74	1,58	0,68	74,15	14,36	25,85	85,64
	1,18	0,80	0,58	1,67	0,53	72,48	13,83	27,52	86,17
	0,85	0,60	0,43	1,24	0,40	71,24	13,43	28,76	86,57
	0,6	0,60	0,36	1,24	0,33	70,00	13,10	30,00	86,90
	0,42	0,63	0,35	1,31	0,32	68,69	12,77	31,31	87,23
	0,3	0,80	0,38	1,66	0,36	67,03	12,42	32,97	87,58
	0,212	1,15	0,38	2,38	0,35	64,65	12,06	35,35	87,94
	0,15	1,99	0,57	4,13	0,53	60,52	11,54	39,48	88,46
	0,105	2,98	1,02	6,19	0,94	54,34	10,60	45,66	89,40
	0,074	5,11	1,71	10,60	1,57	43,73	9,02	56,27	90,98
	0,053	5,09	2,38	10,57	2,19	33,17	6,83	66,83	93,17
	0,038	4,73	2,11	9,81	1,95	23,36	4,88	76,64	95,12
6	-0,038	11,26	5,28	23,36	4,88	0,00	0,00	100,00	100,00
<b>Total</b>		<b>48,20</b>	<b>108,36</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>				

## APÊNDICE B - Resultados dos ensaios de AI de Bond

Tabela A.2. Cálculo do AI de Bond para itabirito friável – Lote 1



	<b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>		
	<b>Ensaio para determinação do Índice de Abrasão de Bond</b>		
	Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches(LTM-USP)	
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020		
Projeto:	Vale - Nova Lima		
Amostra:	Itabirito Friável		
Peso inicial (g):	95,0891		
Peso final (g):	95,0332		
AI:	0,06		
Observações:			

Tabela A.3. Cálculo do AI de Bond para itabirito friável – Lote 2



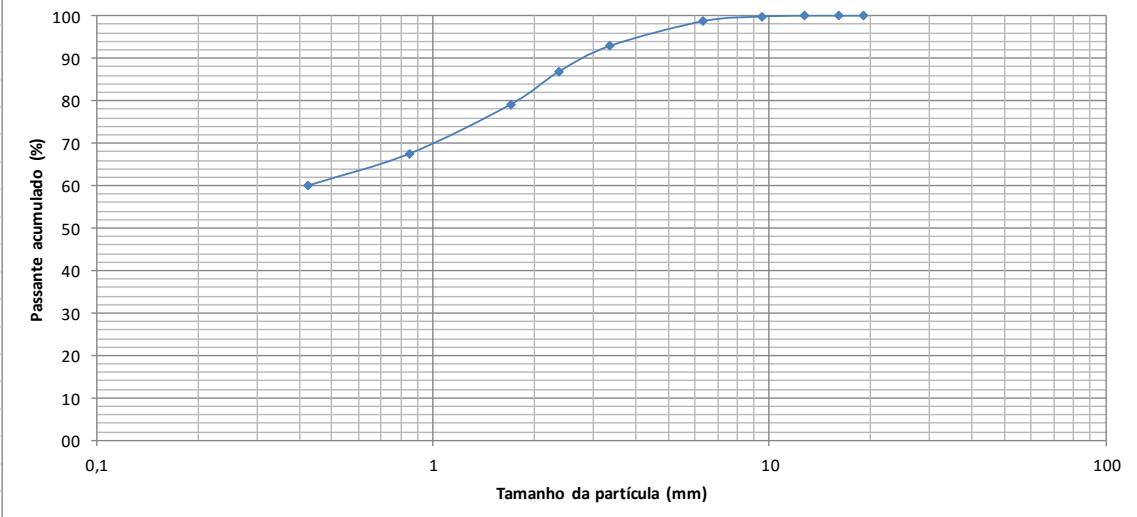


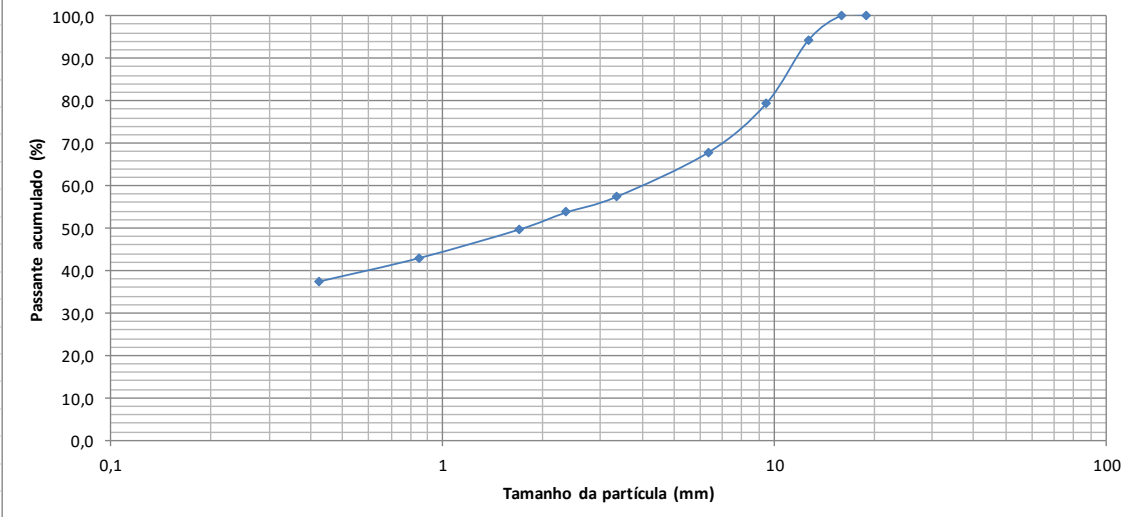
 <p style="text-align: center;"><b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b></p> 					
<b>Ensaio para determinação do Índice de Abrasão de Bond</b>					
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo Almeida				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - junho 2022				
Projeto:	Vale Pebbles				
Amostra:	Am 1 IF				
Peso inicial (g):	96,7707				
Peso final (g):	96,6910				
AI:	0,08				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Tyler)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
3/4"	19	0	0,0	100,0	0,0
5/8"	16	0	0,0	100,0	0,0
1/2"	12,7	0	0,0	100,0	0,0
3/8"	9,5	3,5	0,2	99,8	0,2
1/4"	6,35	17	1,1	98,7	1,3
6	3,35	92,7	5,8	92,9	7,1
8	2,36	96,7	6,1	86,8	13,2
12	1,7	122	7,7	79,1	20,9
20	0,85	184,1	11,6	67,5	32,5
40	0,425	119,1	7,5	60,0	40,0
<b>Total</b>		954,3	60,0	0,0	100,0
<b>Massa inicial</b>		1589,4	100,0		
		1591,3			
					



Tabela A.4. Cálculo do AI de Bond para itabirito compacto – Lote 1

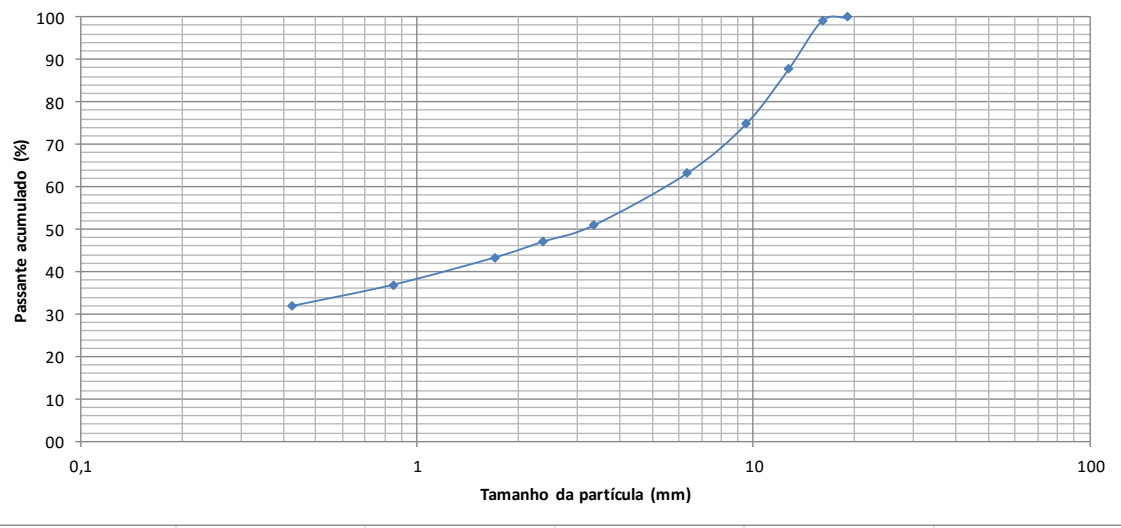
 <p style="text-align: center;"><b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b></p> 					
<b>Ensaio para determinação do Índice de Abrasão de Bond</b>					
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches(LTM-USP)				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020				
Projeto:	Vale - Nova Lima				
Amostra:	Itabirito Compacto				
Peso inicial (g):	95,4298				
Peso final (g):	95,0335				
AI:	0,40				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Tyler)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
3/4"	19	0	0,0	100,0	0,0
5/8"	16	0	0,0	100,0	0,0
1/2"	12,7	91,71	5,8	94,2	5,8
3/8"	9,5	231,96	14,8	79,4	20,6
1/4"	6,35	180,34	11,5	67,9	32,1
6	3,35	163,56	10,4	57,4	42,6
8	2,36	57,63	3,7	53,8	46,2
12	1,7	63,22	4,0	49,7	50,3
20	0,85	104,71	6,7	43,1	56,9
40	0,425	85,97	5,5	37,6	62,4
<b>Total</b>		589,19	37,6	0,0	100,0
<b>Massa inicial</b>		1568,3	100,0		
		1571,6			

Tamanho da partícula (mm)	Passante acumulado (%)
0,425	37,6
0,85	43,1
1,7	49,7
2,36	53,8
3,35	57,4
6,35	67,9
9,5	79,4
12,7	94,2
19	100,0

Tabela A.5. – Cálculo do AI de Bond para itabirito compacto – Lote 2

 <p style="text-align: center;"><b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b></p> 					
<b>Ensaio para determinação do Índice de Abrasão de Bond</b>					
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo Almeida				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - junho 2022				
Projeto:	Vale Pebbles				
Amostra:	Am 2 IC				
Peso inicial (g):	96,2105				
Peso final (g):	95,7494				
AI:	0,46				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Tyler)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
3/4"	19	0	0,0	100,0	0,0
5/8"	16	11,9	0,7	99,3	0,7
1/2"	12,7	182,2	11,5	87,8	12,2
3/8"	9,5	205,4	12,9	74,8	25,2
1/4"	6,35	185,1	11,7	63,2	36,8
6	3,35	195,1	12,3	50,9	49,1
8	2,36	61,9	3,9	47,0	53,0
12	1,7	59,1	3,7	43,2	56,8
20	0,85	101,9	6,4	36,8	63,2
40	0,425	79,8	5,0	31,8	68,2
		504,5	31,8	0,0	100,0
<b>Total</b>		1586,9	100,0		
<b>Massa inicial</b>		1585,9			

Tamanho da partícula (mm)	Passante acumulado (%)
0,425	31,8
0,85	36,8
1,7	43,2
2,36	47,0
3,35	50,9
6,35	63,2
9,5	74,8
12,7	87,8
16	99,3
19	100,0

## APÊNDICE C - Resultados dos ensaios de LCPC

Tabela A.6. Cálculo do índice LCPC para itabirito friável – Lote 1



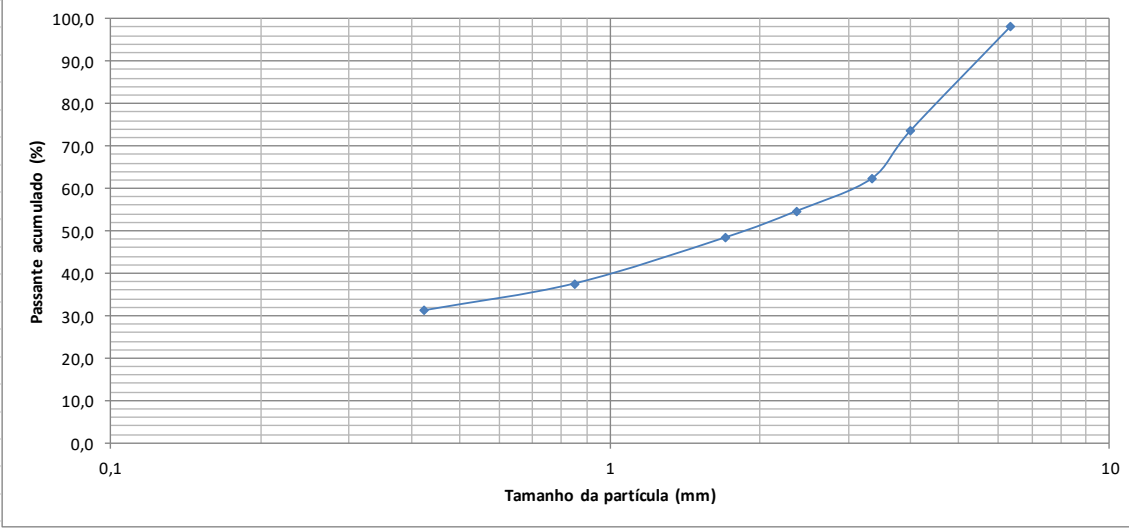
	<b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>				
	<b>Ensaio para determinação da abrasividade e britabilidade- Norma NF P 18-579</b>				
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches(LTM-USP)				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020				
Projeto:	Vale - Nova Lima				
Amostra:	Itabirito Friável				
Peso amostra (g):	500,72				
Peso inicial (g):	46,1219				
Peso final (g):	46,0700				
Abrasividade	104				
Britabilidade Metso (%):	48				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Mesh US)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,35	9,73	2,0	98,0	2,0
5	4	121,16	24,6	73,5	26,5
6	3,35	55,17	11,2	62,3	37,7
8	2,36	38,09	7,7	54,6	45,4
12	1,7	30,55	6,2	48,4	51,6
20	0,85	53,31	10,8	37,6	62,4
40	0,425	31,13	6,3	31,3	68,7
		154,21	31,3	0,0	100,0
<b>Total</b>		493,35	100,0		
					

Tabela A.7. Cálculo do índice LCPC para itabirito friável – Lote 2



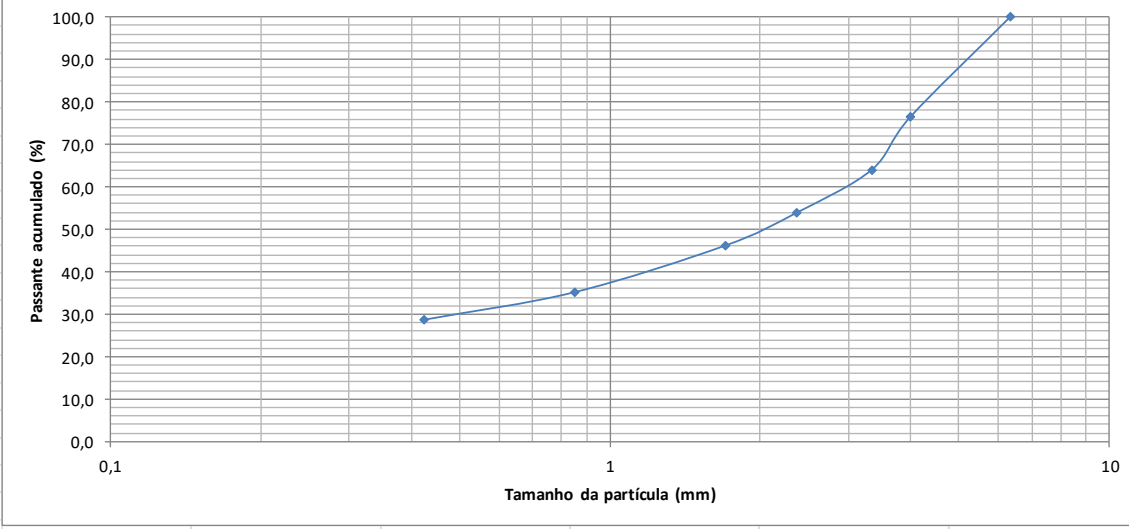
 <p style="text-align: center;"><b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Ensaio para determinação da abrasividade e britabilidade- Norma NF P 18-579</b></p> 					
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo Almeida				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - junho 2022				
Projeto:	Vale Pebbles				
Amostra:	Am 2 - IF				
Peso amostra (g):	501,30				
Peso inicial (g):	46,6922				
Peso final (g):	46,6321				
Abrasividade (g/t):	120				
Britabilidade Metso (%):	46				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Mesh US)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,35	0	0,0	100,0	0,0
5	4	117,5	23,6	76,4	23,6
6	3,35	61,7	12,4	64,0	36,0
8	2,36	50,8	10,2	53,8	46,2
12	1,7	38,2	7,7	46,2	53,8
20	0,85	54,4	10,9	35,2	64,8
40	0,425	32,2	6,5	28,8	71,2
<b>Total</b>		143,4	28,8	0,0	100,0
		498,20	100,0		
					

Tabela A.8. Cálculo do índice LCPC para itabirito compacto – Lote 1



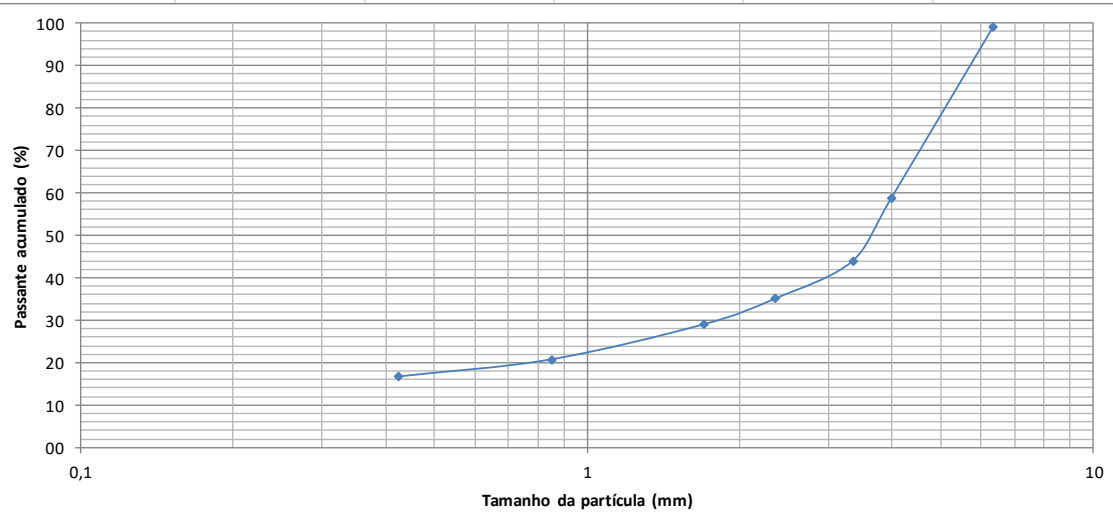


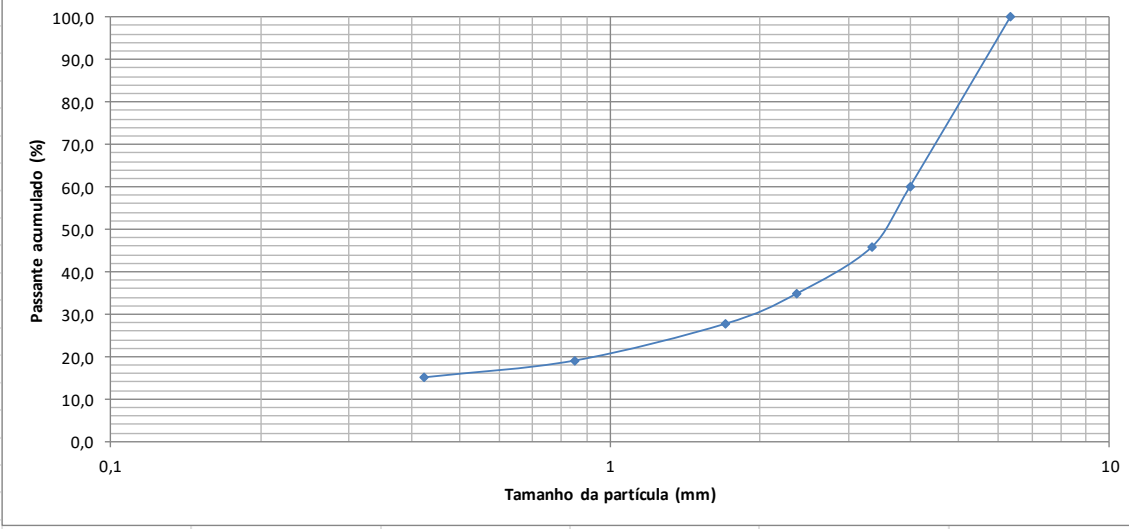
 <p style="text-align: center;"><b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b>  <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b>  <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Ensaio para determinação da abrasividade e britabilidade- Norma NF P 18-579</b></p> 					
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches(LTM-USP)				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020				
Projeto:	Vale - Nova Lima				
Amostra:	Itabirito Compacto				
Peso amostra (g):	500,91				
Peso inicial (g):	46,1001				
Peso final (g):	45,9184				
Abrasividade	363				
Britabilidade Metso (%):	29				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Mesh US)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,35	4,42	0,9	99,1	0,9
5	4	200,24	40,3	58,8	41,2
6	3,35	74,09	14,9	43,8	56,2
8	2,36	43,75	8,8	35,0	65,0
12	1,7	30,43	6,1	28,9	71,1
20	0,85	40,99	8,3	20,6	79,4
40	0,425	20,02	4,0	16,6	83,4
		82,34	16,6	0,0	100,0
<b>Total</b>		496,28	100,0		
					



Tabela A.9. Cálculo do índice LCPC para itabirito compacto – Lote 2

 <p style="text-align: center;"><b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Ensaio para determinação da abrasividade e britabilidade- Norma NF P 18-579</b></p> 					
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo Almeida				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - junho 2022				
Projeto:	Vale Pebbles				
Amostra:	Am 2 - IC				
Peso amostra (g):	499,00				
Peso inicial (g):	46,5385				
Peso final (g):	46,3520				
Abrasividade (g/t):	374				
Britabilidade Metso (%):	28				
Observações:					
<b>Distribuição granulométrica do produto</b>					
Malha (Mesh US)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,35	0	0,0	100,0	0,0
5	4	198,4	39,8	60,2	39,8
6	3,35	71,3	14,3	45,8	54,2
8	2,36	55,1	11,1	34,8	65,2
12	1,7	35	7,0	27,7	72,3
20	0,85	42,9	8,6	19,1	80,9
40	0,425	19,6	3,9	15,2	84,8
<b>Total</b>		75,6	15,2	0,0	100,0
		497,90	100,0		
					



## APÊNDICE D - Resultados dos ensaios de WI de Bond

Tabela A.10. Cálculo do WI de Bond para itabirito friável – Lote 1 com escalpe

		Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais										
		Teste de Moabilidade de Bond - Moinho de Bolas										
<b>Ciente:</b>		Julia										
<b>Amostra:</b>		Itabirito Friavel Lote 1										
<b>Responsável:</b>		Julia / Rodrigo										
<b>Data:</b>		21/03/2023										
Malha do teste (M):		150 µm										
6872,7	Densidade aparente (Yap):	6,8098 kg x 22,046 = 150,13 lb/ft³										
6730,5	Fração da alimentação passante na malha do teste (k):	0,6740										
6826,3	Carga do moinho - 700 cc (C):	1684,15 g										
6809,833	Produto Ideal do período (IPP):	481,19 g										
Período	Q	R	S	+ M	T	U	V	X	Z	AA	AB	AC
	Número de Rotações	Complemento da carga	- M na carga	Massa retida na malha do teste	Produto	Produto Líquido	Produto Líquido por rotação	Produto médio dos 3 últimos períodos	Carga circulante	Medida de Gramas por Revoluções dos Últimos Três Períodos	5% da média de AA	Diferença dos três últimos valores
	$\frac{(IPP) - (T_a \cdot k)}{V_a}$	T <sub>a</sub>	(R x k)		C - (+ M)	T - S	U/Q	$(T + T_a + T_a - 1) / 3$	(C - X)/X		H x 0,05	Maior coluna V - Menor coluna V
	(rev)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g/rev)	(g)	(%)	(g/rev)		
1	1	1684,15	1135,18	581,85	1102,30	-32,87	-32,874					
2	8	1102,30	742,99	882,26	801,89	58,90	7,396					
3	2	801,89	540,50	1099,35	584,80	44,30	22,150	829,7	102,99	-1,11	-0,06	-40,27
4	4	584,80	394,18	1240,95	443,20	49,03	12,480	610,0	176,11	14,01	0,70	9,67
5	15	443,20	298,73	1270,96	413,19	114,46	7,829	480,4	250,57	14,15	0,71	14,32
6	26	413,19	278,51	1241,27	442,88	164,38	6,350	433,1	288,87	8,89	0,44	4,65
7	29	442,88	298,52	1225,74	458,41	159,89	5,558	438,2	284,37	6,58	0,33	1,48
8	31	458,41	308,99	1215,94	468,21	159,23	5,139	456,5	268,92	5,68	0,28	0,79
9	32	468,21	315,59	1214,92	469,23	153,64	4,768	465,3	261,96	5,16	0,26	0,42
10												
11												
12												
OBS:		* Para o 1º período adotar: Zero se (k) >= 50% ----> Rotação do 2º período = 20 30 se (k) < 50%										
		** Para o 1º período: R = C										
		*** O índice "a" refere-se ao período anterior										
		****O regime é alcançado quando T = IPP(+/- 5%)										
Calculo do Valor do WI												
Abertura da Malha do Teste (M):		150 µm										
P80 da Alimentação do Teste (F):		717,90 µm										
P80 da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):		87,13 µm										
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Y):		5,16 g/revol										
WI =		5,2 kWh/sht 5,8 kWh/t										



Tabela A.11. Cálculo do WI de Bond para itabirito compacto – Lote 1 com escalpe

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</p> </div>  </div>														
<b>Teste de Moabilidade de Bond - Moinho de Bolas</b>														
<b>Ciente:</b>		<b>Julia</b>												
<b>Amostra:</b>		<b>Itabirito Compacto Lote 1 com escalpe</b>												
<b>Responsável:</b>		<b>Julia</b>												
<b>Data:</b>		<b>23/03/2023</b>												
	Malha do teste ( <b>M</b> ):	150	µm											
7638,1	Densidade aparente ( <b>Yap</b> ):	7,6180	kg	x	22,046	=	167,95	lb/ft <sup>3</sup>						
7543,3	Fração da alimentação passante na malha do teste ( <b>k</b> ):	0,3245												
7672,5	Carga do moinho - 700 cc ( <b>C</b> ):	1884,02	g											
7617,967	Produto Ideal do período ( <b>IPP</b> ):	538,29	g											
Período	Q	R	S	+ M	T	U	V	X	Z	AA	AB	AC		
	Número de Rotações	Complemento da carga	- M na carga	Massa retida na malha do teste	Produto	Produto Líquido	Produto Líquido por rotação	Prudoto médio dos 3 últimos períodos	Carga circulante	Media de Gramas por Revoluções dos Últimos Três Períodos	5% da média de AA	Diferença dos três últimos valores		
	$\frac{(IPP) - (T_a \times k)}{V_a}$	$T_a$	(R x k)		$C - (+ M)$	$T - S$	$U/Q$	$(T+T_a+T_a-1)/3$	$(C - X)/X$		$H \times 0,05$	Maiores colunas V - Menor colunas V		
	(rev)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g/rev)	(g)	(%)	(g/rev)				
1	1	1884,02	611,40	1273,76	610,26	-1,15	-1,149							
2	30	610,26	198,04	1525,11	358,91	160,86	5,362				0,14	-6,51		
3	60	358,91	116,47	1519,26	364,76	248,28	4,138	444,6	323,72	2,78	0,22	0,56		
4	101	364,76	118,37	1402,40	481,62	363,24	3,580	401,8	368,94	4,36	0,18	0,83		
5	107	481,62	156,29	1374,57	509,45	353,15	3,309	451,9	316,87	3,68	0,17	0,27		
6	113	509,45	165,33	1339,82	544,20	378,87	3,362	511,8	268,15	3,42	0,17	-0,05		
7	108	544,20	176,60	1350,33	533,69	357,08	3,319	529,1	256,07	3,33	0,17	0,04		
8	110	533,69	173,19	1351,60	532,42	359,22	3,265	536,8	250,99	3,32				
9														
10														
11														
12														
<b>OBS:</b> * Para o 1º período adotar: Zero se (k) >= 50% ----> Rotação do 2º período = 20 30 se (k) < 50% ** Para o 1º período: R = C *** O índice "a" refere-se ao período anterior ****O regime é alcançado quando T = IPP(+/- 5%)														
<b>Calculo do Valor do WI</b>														
Abertura da Malha do Teste (M):		<b>150 µm</b>												
P80 da Alimentação do Teste (F):		<b>1952,99 µm</b>												
P80 da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):		<b>82,17 µm</b>												
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Y):		<b>3,32 g/revol</b>												
<b>WI =</b>		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;"><b>6,0 kWh/sht</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>6,6 kWh/t</b></td> </tr> </table>											<b>6,0 kWh/sht</b>	<b>6,6 kWh/t</b>
<b>6,0 kWh/sht</b>														
<b>6,6 kWh/t</b>														



## APÊNDICE E - Resultado do ensaio Tumbling

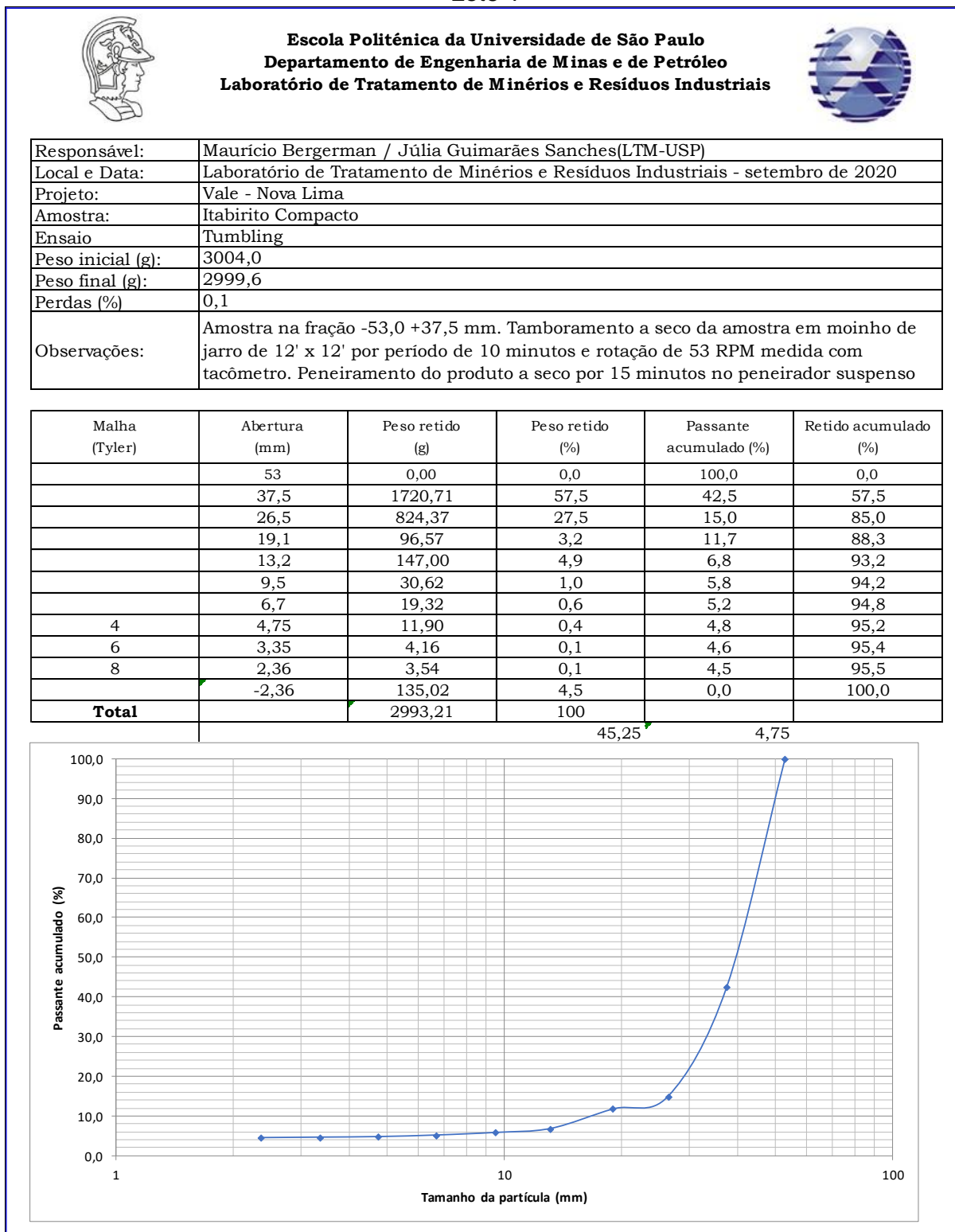
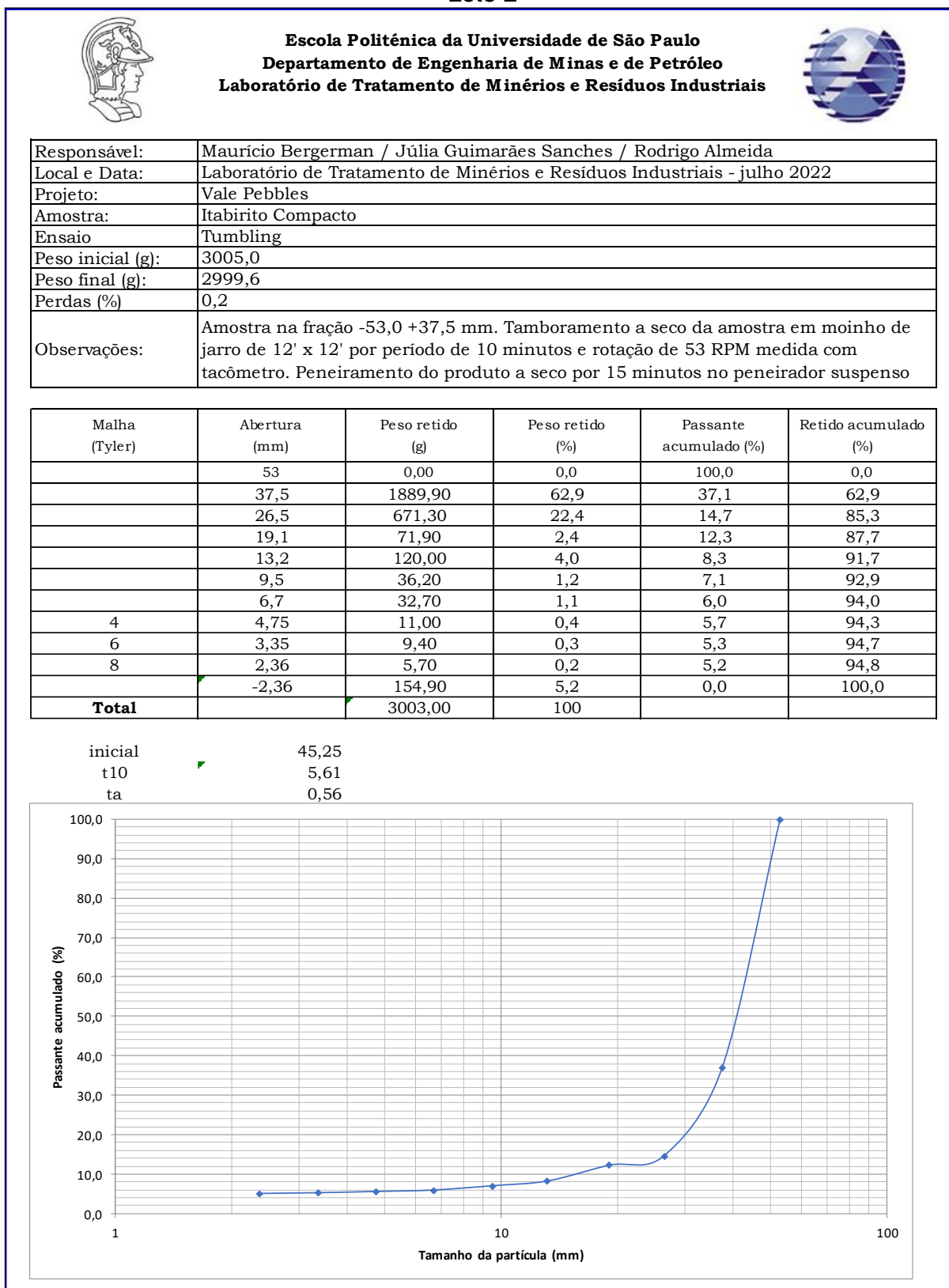


Tabela A.12. Cálculo do índice ta a partir do ensaio de *Tumbling* para itabirito compacto – Lote 1

Tabela A.13. Cálculo do índice  $t_a$  a partir do ensaio de *Tumbling* para itabirito compacto – Lote 2

## APÊNDICE F - Cálculos do ensaio de jarro

Tabela A.14. Moagem primária sem substituição – Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>							
<b>Jar Test</b>							
Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)						
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 08/2021						
Projeto:	Vale Pebbles						
Amostra:	Alimentação da moagem: 70% IF + 30% IC. Pebbles: itabirito compacto. Moagem 100%						
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox						
Diâmetro do jarro (m):	0,3048						
Comprimento do jarro (m):	0,3048						
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222						
Carga do moinho - J (%):	30						
Porosidade da carga (%):	40						
Volume de vazios carga (mL):	2669						
Massa dos corpos moedores (g):	31.103,9						
m	Bolas de aço: 34% 65 mm/ 43% 50 mm/ 17% 40 mm/ 6% 25 mm						
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54						
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57						
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56						
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46						
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12						
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )							
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53						
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14						
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1						
Massa de sólidos (g):	4226,2						
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3						
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9						
Massa de água (g):	1484,9						
Volume de sólidos (mL)	#DIV/0!						
Sólidos (%)	74						
Fração da carga preenchida por polpa (%)	100						
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2						
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0						
Velocidade crítica (rpm)	76,6						
Observações:							
	<b>Alimentação</b>	<b>1 min</b>	<b>3 min</b>	<b>3 min 30 seg</b>	<b>5 min</b>	<b>10 min</b>	<b>15 min</b>
<b>F<sub>80</sub> (mm)</b>	7,69	4,12	1,65	0,70	0,24	0,13	0,09
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.226,20	4.225,40	4.226,40	4.225,40	4.225,80	4.225,60
<b>Torque vazio</b>		2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
<b>Torque ensaio</b>		20,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		0,46	1,38	1,60	2,29	4,58	6,87
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		0,40	1,21	1,39	1,99	3,99	5,98
<b>P1000 (%)</b>		72,05	79,15	80,81	84,39	90,52	93,31
<b>F1000 (%)</b>		57,94	57,94	57,94	57,94	57,94	57,94
<b>% nova de -1 mm</b>		14,11	21,21	22,87	26,45	32,58	35,37
<b>SSE 1000 Rowland (kwh/t)</b>		3,25	6,52	6,98	8,66	14,06	19,43
<b>SSE 1000 Torque (kwh/t)</b>			5,69	6,10			
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	1	3,03	5	10	15	
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	58	72	79	84	91	93	
<b>Tempo para 80% passante em 1,00 mm</b>	3,35	=	3	min	21	seg	



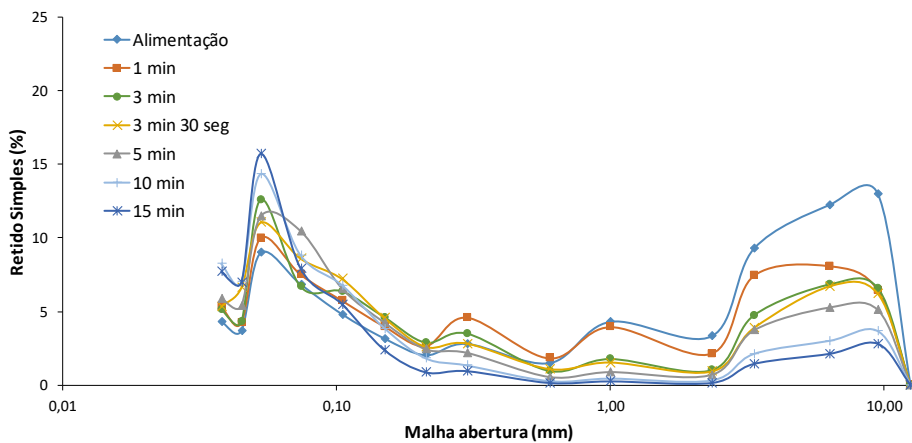
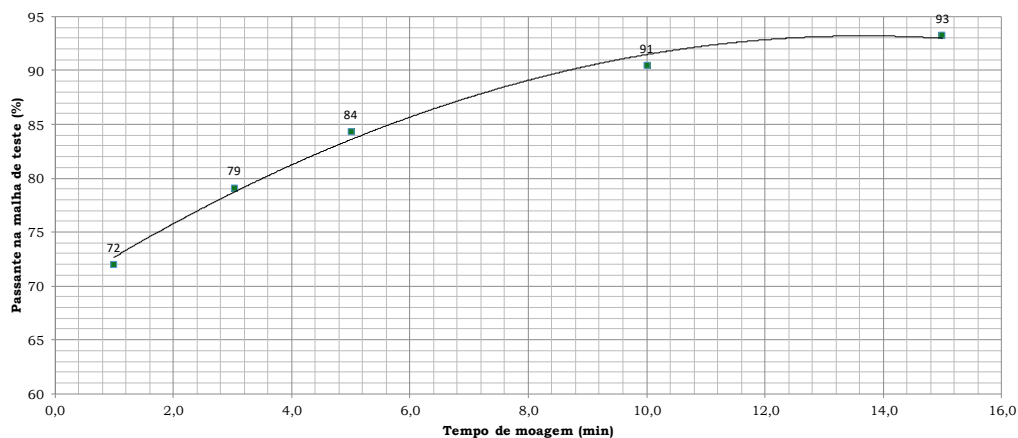
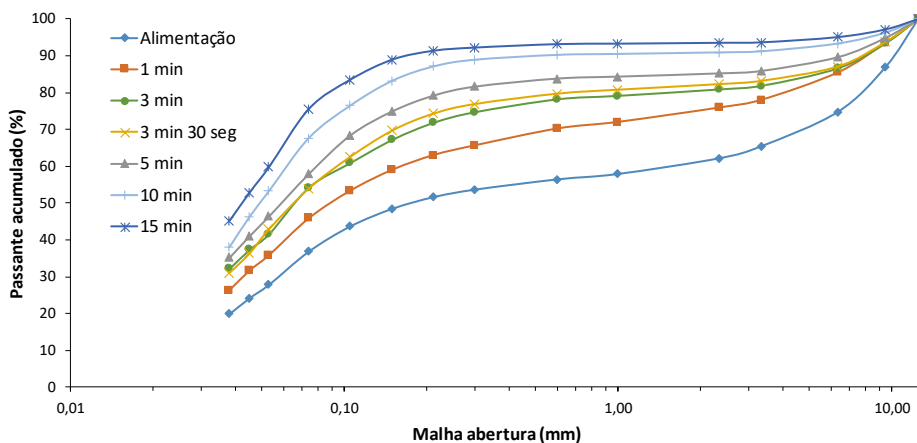


Tabela A.15. Moagem primária substituição de 10% - Moinho 1



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



## Jar Test

Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021
Projeto:	Vale Pebbles
Amostra:	Alimentação da moagem: 70% IF + 30% IC. Pebbles: itabirito compacto. Moagem 90%
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox
Diâmetro do jarro (m):	0,3048
Comprimento do jarro (m):	0,3048
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222
Carga do moinho - J (%):	30
Porosidade da carga (%):	40
Volume de vazios carga (mL):	2669
Massa dos corpos moedores (g):	29.410,6
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 34% 65 mm/ 43% 50 mm/ 17% 40 mm/ 6% 25 mm
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )	
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1
Massa de sólidos (g):	4226,2
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9
Massa de água (g):	1484,9
Volume de sólidos (mL)	#DIV/0!
Sólidos (%)	74
Fração da carga preenchida por polpa (%)	100
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0
Velocidade crítica (rpm)	76,6
Observações:	

	Alimentação	2 min	3 min 40 seg	5 min
<b>P<sub>80</sub> (mm)</b>	7,69	2,73	1,01	0,31
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4224,70	4225,60	4225,40
<b>Massa sólidos - saída</b>		4226,90	4282,00	4284,80
<b>Torque vazio</b>		2,69	2,61	2,69
<b>Torque ensaio</b>		20,09	19,41	20,09
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,10	0,10	0,10
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - entrada</b>		0,87	1,59	2,17
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - saída</b>		0,87	1,57	2,14
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - entrada</b>		0,79	1,41	1,98
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - saída</b>		0,79	1,39	1,96
<b>P1000 (%)</b>		76,51	79,98	83,15
<b>F1000 (%)</b>		57,94	57,94	57,94
<b>% nova de -1 mm</b>		18,57	22,04	25,20
<b>SSE 1000 Rowland (kwh/t)</b>		4,66	7,12	8,47
<b>SSE 1000 Torque (kwh/t)</b>			6,29	

	0	2	3,62	5
<b>Tempo de moagem (min)</b>				
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	58	77	80	83

Tempo para 80% passante em 1,00 mm	3,59	=	3	min	36	seg
------------------------------------	------	---	---	-----	----	-----

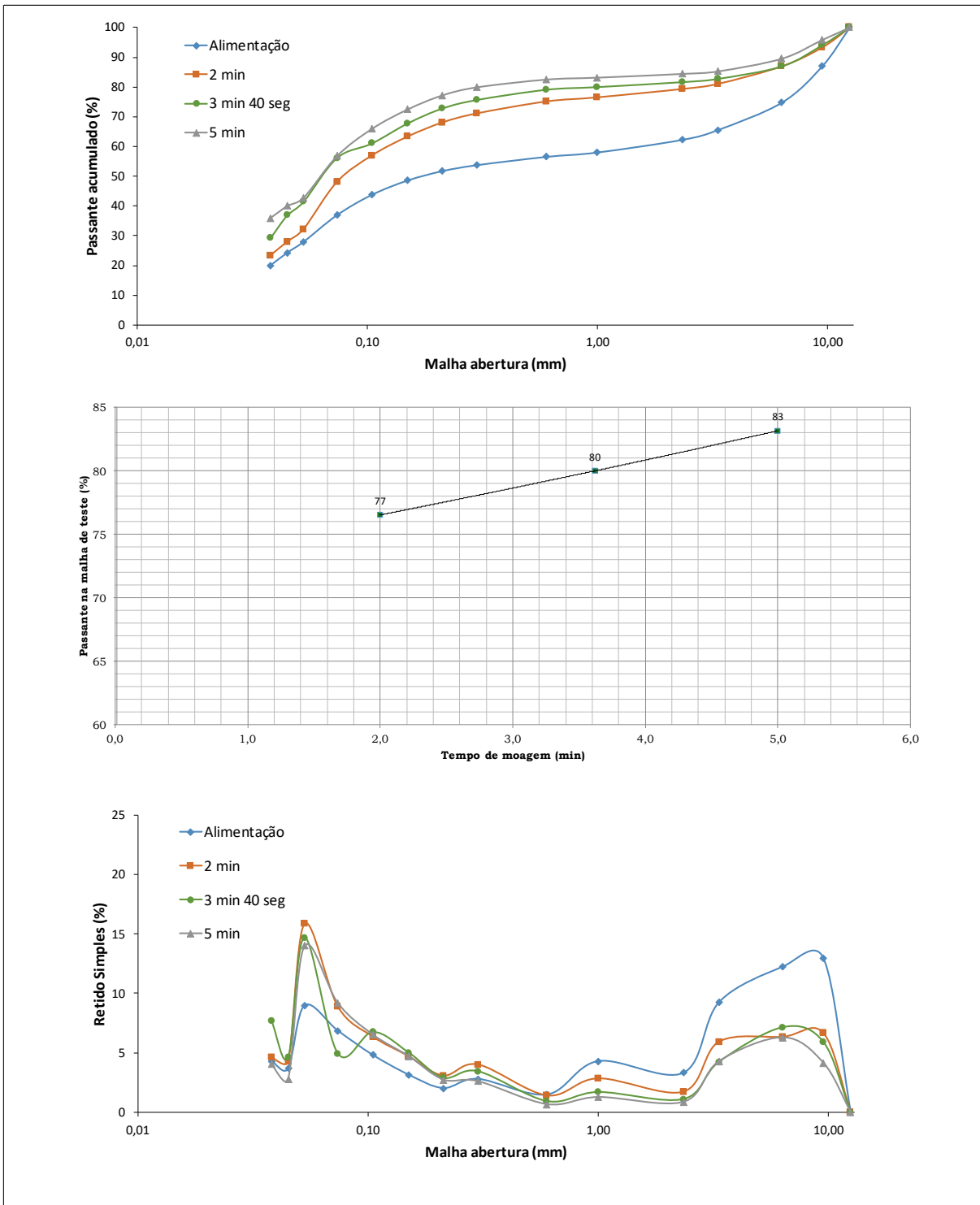




Tabela A.16. Moagem primária substituição de 25% - Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>					
<b>Jar Test</b>					
Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)				
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021				
Projeto:	Vale Pebbles				
Amostra:	Alimentação da moagem: 70% IF + 30% IC. Pebbles: itabirito compacto; Moagem 75% Bolas + 25% pebbles				
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox				
Diâmetro do jarro (m):	0,3048				
Comprimento do jarro (m):	0,3048				
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222				
Carga do moinho - J (%):	30				
Porosidade da carga (%):	40				
Volume de vazios carga (mL):	2669				
Massa dos corpos moedores (g):	26.870,7				
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 34% 65 mm/ 43% 50 mm/ 17% 40 mm/ 6% 25 mm				
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54				
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57				
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56				
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46				
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12				
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )					
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53				
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14				
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1				
Massa de sólidos (g):	4226,2				
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3				
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9				
Massa de água (g):	1484,9				
Volume de sólidos (mL)	#DIV/0!				
Sólidos (%)	74				
Fração da carga preenchida por polpa (%)	100				
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2				
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0				
Velocidade crítica (rpm)	76,6				
Observações:					
	<b>Alimentação</b>	<b>4 min</b>	<b>5 min</b>	<b>6 min 50 seg</b>	<b>10 min</b>
<b>P<sub>80</sub> (mm)</b>	7,69	0,94	0,42	0,28	0,16
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.225,80	4.225,00	4.225,20	4.225,50
<b>Massa sólidos - saída</b>		4.367,20	4.388,10	4.450,20	4.855,70
<b>Torque vazio</b>		2,62	2,62	2,67	2,67
<b>Torque ensaio</b>		19,02	19,02	18,76	18,76
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,09	0,09	0,09	0,09
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - entrada</b>		1,58	1,98	2,69	3,96
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - saída</b>		1,53	1,91	2,55	3,44
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - entrada</b>		1,49	1,87	2,49	3,67
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - saída</b>		1,45	1,80	2,37	3,19
<b>P1000 (%)</b>		80,20	82,87	84,03	89,12
<b>F1000 (%)</b>		57,94	57,94	57,94	57,94
<b>% nova de -1 mm</b>		22,26	24,93	26,09	31,18
<b>SSE 1000 Rowland (kwh/t)</b>		6,88	7,64	9,79	11,04
<b>SSE 1000 Torque (kwh/t)</b>		6,50		9,08	
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	5	6,8	10	
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	58	83	84	89	
<b>Tempo para 80% passante em 1,00 mm</b>	3,27	=	3	min	16 seg

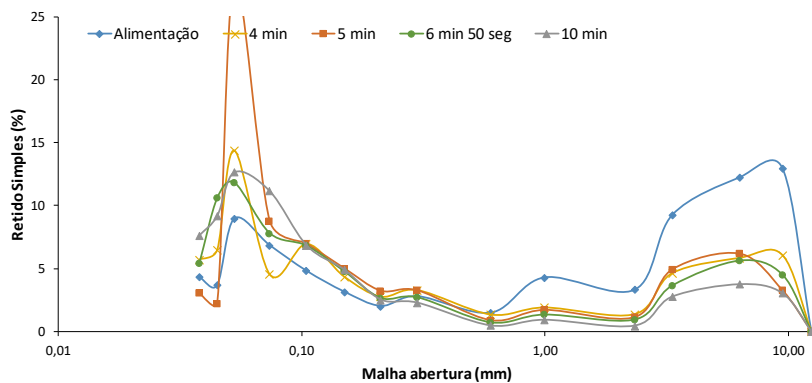
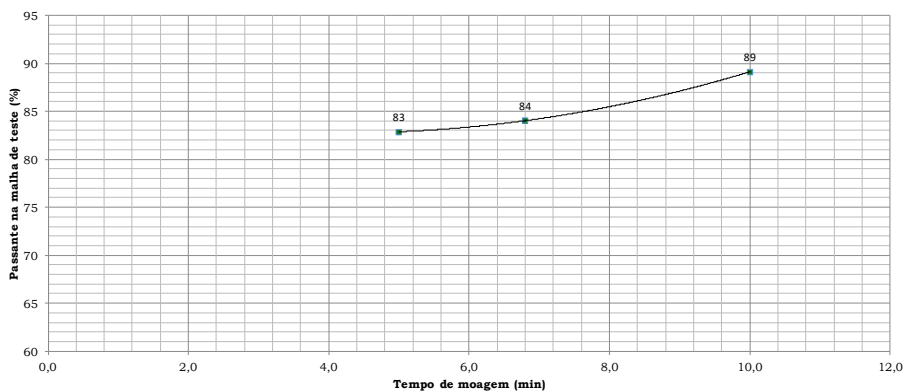
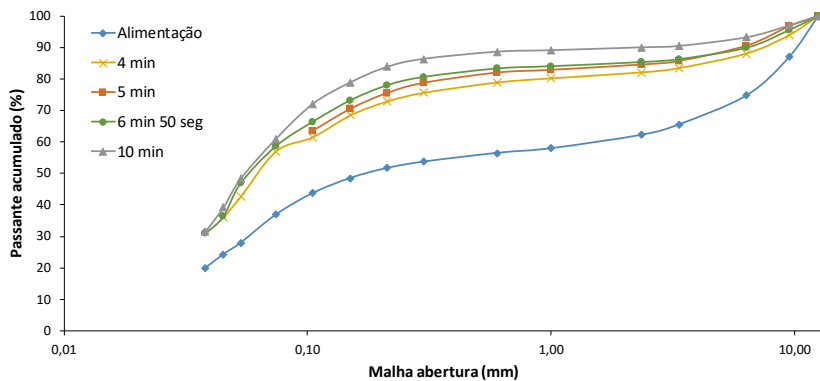




Tabela A.17. Moagem primária substituição de 50% - Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>						
<b>Jar Test</b>						
Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)					
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021					
Projeto:	Vale Pebbles					
Amostra:	Alimentação da moagem: 70% IF + 30% IC. Pebbles: itabirito compacto. Moagem 50% bolas + 50% pebbles					
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox					
Diâmetro do jarro (m):	0,3048					
Comprimento do jarro (m):	0,3048					
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222					
Carga do moinho - J (%):	30					
Porosidade da carga (%):	40					
Volume de vazios carga (mL):	2669					
Massa dos corpos moedores (g):	22.637,4					
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 34% 65 mm/ 43% 50 mm/ 17% 40 mm/ 6% 25 mm					
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54					
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57					
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56					
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46					
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12					
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )						
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53					
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14					
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1					
Massa de sólidos (g):	4226,2					
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3					
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9					
Massa de água (g):	1484,9					
Volume de sólidos (mL)	#DIV/0!					
Sólidos (%)	74					
Fração da carga preenchida por polpa (%)	100					
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2					
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0					
Velocidade crítica (rpm)	76,6					
Observações:						
	<b>Alimentação</b>	<b>6 min</b>	<b>7 min</b>	<b>20 min</b>		
<b>P<sub>80</sub> (mm)</b>	7,69	0,64	0,64	0,10		
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.225,80	4225,50	4225,80		
<b>Massa sólidos - saída</b>		4.475,10	4639,90	5017,50		
<b>Torque vazio</b>		2,65	2,73	2,73		
<b>Torque ensaio</b>		17,47	17,41	17,41		
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,09	0,08	0,08		
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		1,89	2,09	5,61		
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		1,91	2,09	5,63		
<b>P1000 (%)</b>		1,72	80,87	91,77		
<b>F1000 (%)</b>		4,28	57,94	57,94		
<b>% nova de -1 mm</b>		-2,56	22,93	33,83		
<b>SSE 1000 Rowland (kwh/t)</b>		-73,76	9,10	16,60		
<b>SSE 1000 Torque (kwh/t)</b>			9,13			
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	6,87	7	20		
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	58	81	83	92		
Tempo para 80% passante em 1,00 mm	6,41	=	6	min	24	seg

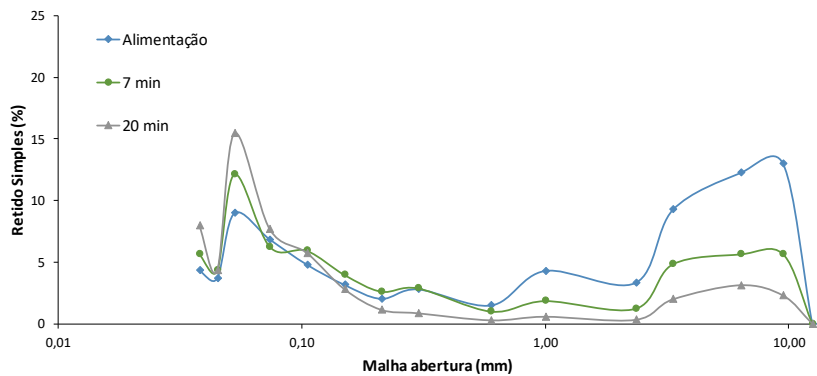
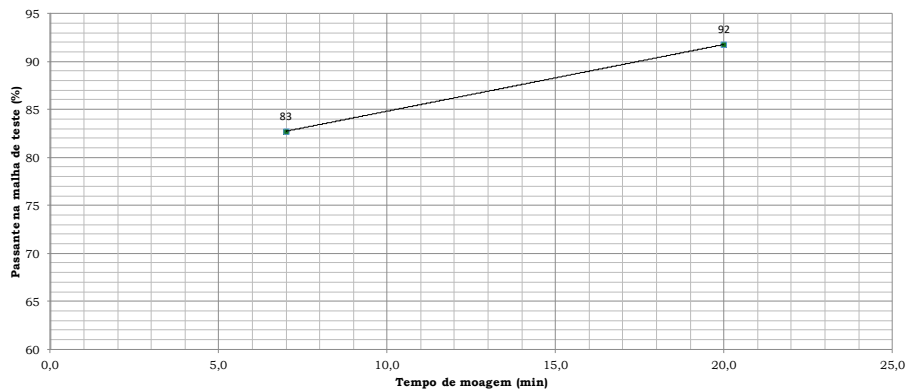
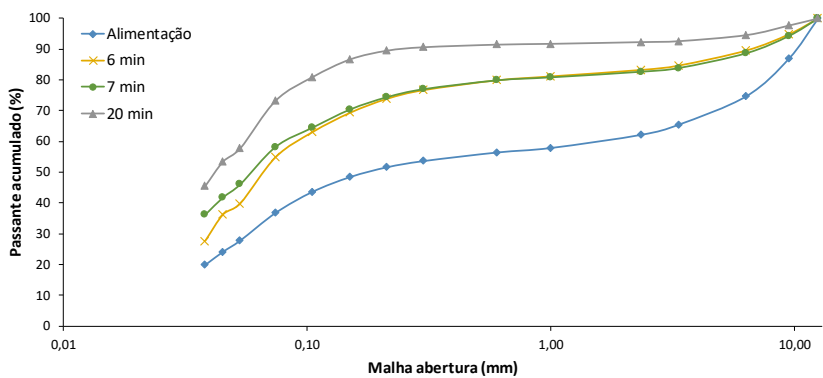




Tabela A.18. Moagem primária substituição de 100% - Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>						
<b>Jar Test</b>						
Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)					
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021					
Projeto:	Vale Pebbles					
Amostra:	Alimentação da moagem: 70% IF + 30% IC. Pebbles: itabirito compacto. Moagem 100% pebbles					
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox					
Diâmetro do jarro (m):	0,3048					
Comprimento do jarro (m):	0,3048					
Volume do jarro (m3):	0,0222					
Carga do moinho - J (%):	30					
Porosidade da carga (%):	40					
Volume de vazios carga (mL):	2669					
Massa dos corpos moedores (g):	14.170,9					
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 34% 65 mm/ 43% 50 mm/ 17% 40 mm/ 6% 25 mm					
Massa específica IC (g/cm3)	3,54					
Massa específica IF (g/cm3)	3,57					
Massa específica Blend (g/cm3)	3,56					
Densidade aparente IC (g/cm3)	2,46					
Densidade aparente IF (g/cm3)	2,12					
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm3)						
Densidade aparente Pebble (g/cm3)	1,53					
Densidade de polpa (g/cm3)	2,14					
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1					
Massa de sólidos (g):	4226,2					
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3					
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9					
Massa de água (g):	1484,9					
Volume de sólidos (mL)	#DIV/0!					
Sólidos (%)	74					
Fração da carga preenchida por polpa (%)	100					
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2					
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0					
Velocidade crítica (rpm)	76,6					
Observações:						
	<b>Alimentação</b>	<b>10 min</b>	<b>20 min</b>	<b>23 min 30 seg</b>	<b>30 min</b>	<b>40 min</b>
<b>P<sub>80</sub> (mm)</b>	7,69	3,93	0,80	0,42	0,57	0,11
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.226,00	4.225,30	4.225,90	4.225,70	4.225,10
<b>Massa sólidos - saída</b>		4.913,60	5.278,50	5.311,00	5.215,60	5.593,30
<b>Torque vazio</b>		2,67	2,67	2,67	2,67	2,67
<b>Torque ensaio</b>		13,66	13,66	13,66	13,66	13,66
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - entrada</b>		2,09	4,17	4,90	6,26	8,35
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - saída</b>		1,79	3,34	3,90	5,07	6,31
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - entrada</b>		2,50	5,01	5,89	7,51	10,02
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - saída</b>		2,15	4,01	4,68	6,09	7,57
<b>P1000 (%)</b>		74,67	80,29	81,20	80,33	88,30
<b>F1000 (%)</b>		57,94	57,94	57,94	57,94	57,94
<b>% nova de -1 mm</b>		16,73	22,35	23,26	22,39	30,36
<b>SSE 1000 Rowland (kwh/t)</b>		10,73	14,95	16,78	22,65	20,77
<b>SSE 1000 Torque (kwh/t)</b>				20,13		
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	10	20	23,5	30	40
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	58	75	80	81	80	88
<b>Tempo para 80% passante em 1,00 mm</b>	19,49	=	19	min	29	seg



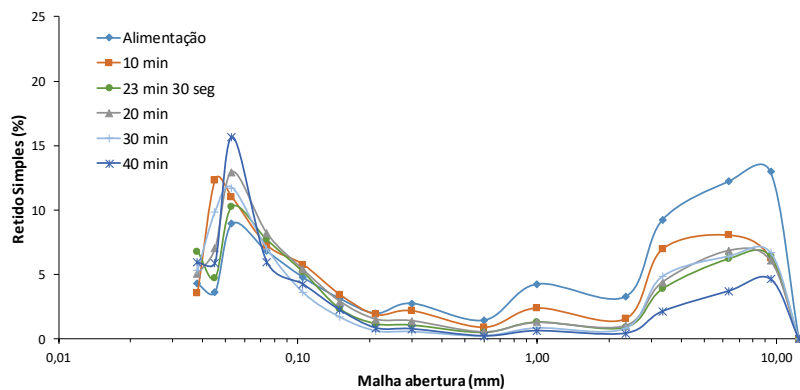
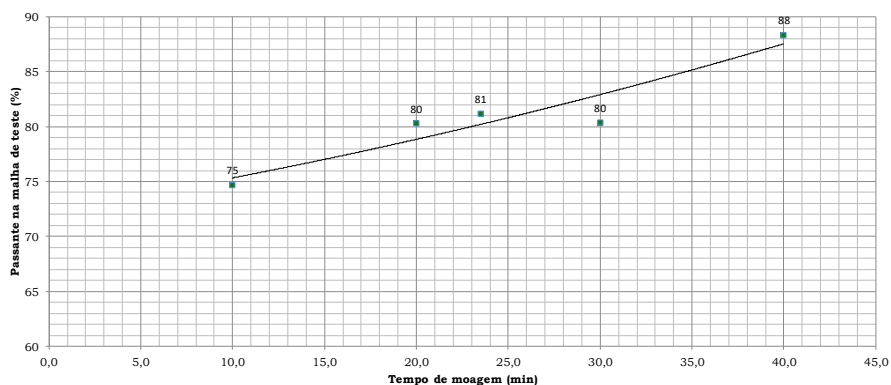
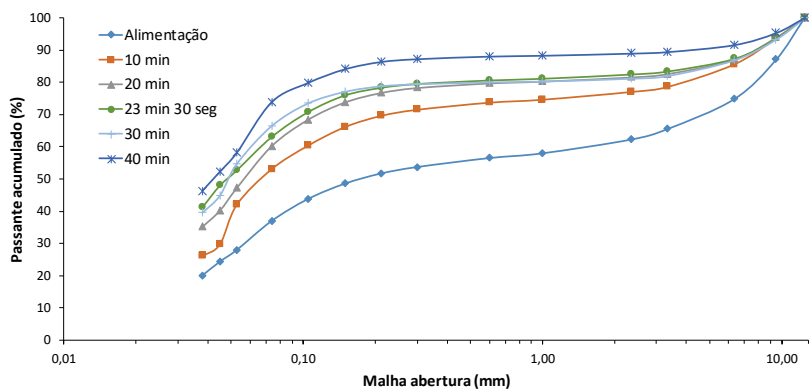


Tabela A.19. Moagem primária sem substituição – Moinho 2

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais	
<b>Jar Test</b>	
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida
Local e Data:	LTM UFRJ
Projeto:	Vale Pebbles
Amostra:	Moagem primária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 100% Bolas
Jarro:	23"x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras
Diâmetro do jarro (m):	0,5800
Comprimento do jarro (m):	0,2400
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634
Carga do moinho - J (%):	30
Porosidade da carga (%):	40
Volume de vazios carga (mL):	7609
Massa total dos corpos moedores (g):	88.682,5
Porcentagem de bolas:	100%
Massa de bolas (g):	88.682,5
	65 mm = 30.152,0      50 mm = 38.133,5      40 mm = 15.076,0      25 mm = 5.320,9
Porcentagem de pebbles:	0%
Massa de pebbles (g):	0,0
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):	2,52
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14
Massa de polpa (g):	25.911,6
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4
Massa de água (g):	6.737,0
Volume de sólidos (mL):	7.609,0
Sólidos (%):	74
Fração do moinho com sólidos - f <sub>c</sub> (%):	12
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%):	100
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas:	40,0
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%):	72,0
Velocidade crítica (rpm):	55,6
Observações:	

	Alimentação	4 min
Massa alim pebbles (g)		0,00
P80 (mm)	6,990	0,322
Torque vazio		-4,53
Torque ensaio		105,11
Potência - Rowland (kW)		0,09
Potência - Torque (kW)		0,46
Energia específica - Rowland (kWh/t)		1,49
Energia específica - Torque (kWh/t)		1,60
P1000 (%)		87,39
F1000 (%)		56,44
% nova de -1,00 mm		30,95
SSE 1000 Rowland (kwh/t)		4,82
SSE 1000 Torque (kwh/t)		5,16
Produto Pebbles (g)		
Consumo pebbles (g)		
Consumo pebbles (%)		
Consumo pebbles (t/h)		

Tabela A.20. Moagem primária substituição de 25% - Moinho 2

		Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais			
		<b>Jar Test</b>			
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida				
Local e Data:	LTM UFRJ				
Projeto:	Vale Pebbles				
Amostra:	Alimentação da moagem: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 100% bolas				
Jarro:	23"x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras				
Diâmetro do jarro (m):	0,5800				
Comprimento do jarro (m):	0,2400				
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634				
Carga do moinho - J (%):	30				
Porosidade da carga (%):	40				
Volume de vazios carga (mL):	7609				
Massa total dos corpos moedores (g):	76.612,8				
Porcentagem de bolas:	75%				
Massa de bolas (g):	66.511,9				
	65 mm = 22.614,0	50 mm = 28.600,1	40 mm = 11.307,0	25 mm = 3.990,7	
Porcentagem de pebbles:	25%				
Massa de pebbles (g):	10.100,9				
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54				
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57				
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56				
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46				
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12				
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):	2,52				
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53				
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14				
Massa de polpa (g):	25.911,6				
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6				
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2				
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4				
Massa de água (g):	6.737,0				
Volume de sólidos (mL):	7.609,0				
Sólidos (%):	74				
Fração do moinho com sólidos - f <sub>c</sub> (%):	12				
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%):	100				
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas:	40,0				
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%):	72,0				
Velocidade crítica (rpm):	55,6				
Observações:					
	<b>Alimentação</b>	<b>5 min</b>	<b>45 min</b>		
<b>Massa alim pebbles (g)</b>		10.103,50	10.102,30		
<b>P80 (mm)</b>	6,990	0,435	0,060		
<b>Torque vazio</b>		-4,53	-4,53		
<b>Torque ensaio</b>		96,08	86,79		
<b>Potência - Rowland (kW)</b>		0,09	0,09		
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,42	0,38		
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		1,61	14,51		
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		1,83	14,96		
<b>P1000 (%)</b>		84,65	99,18		
<b>F1000 (%)</b>		56,44	56,44		
<b>% nova de -1,00 mm</b>		28,21	42,74		
<b>SSE 1000 Rowland (kwh/t)</b>		5,71	33,94		
<b>SSE 1000 Torque (kwh/t)</b>		6,49	35,01		
<b>Produto Pebbles (g)</b>		8.054,40	5.051,30		
<b>Consumo pebbles (g)</b>		2.049,10	5.051,00		
<b>Consumo pebbles (%)</b>		20%	50%		
<b>Consumo pebbles (t/h)</b>		0,004	0,010		
<b>Consumo pebbles (% do produto)</b>		10,2%	21,9%		



Tabela A.21. Moagem primária substituição de 50% - Moinho 2

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais	
<b>Jar Test</b>	
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida
Local e Data:	LTM UFRJ
Projeto:	Vale Pebbles
Amostra:	Moagem primária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 50% Bolas + 50% Pebbles
Jarro:	23"x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras
Diâmetro do jarro (m):	0,5800
Comprimento do jarro (m):	0,2400
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634
Carga do moinho - J (%):	30
Porosidade da carga (%):	40
Volume de vazios carga (mL)	7609
Massa total dos corpos moedores (g):	64.543,0
Porcentagem de bolas	50%
Massa de bolas (g):	44.341,2
	65 mm = 15.076,0      50 mm = 19.066,7      40 mm = 7.538,0      25 mm = 2.660,5
Porcentagem de pebbles:	50%
Massa de pebbles (g):	20.201,8
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )	2,52
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14
Massa de polpa (g)	25.911,6
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4
Massa de água (g):	6.737,0
Volume de sólidos (mL)	7.609,0
Sólidos (%)	74
Fração do moinho com sólidos - f <sub>c</sub> (%)	12
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%)	100
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	40,0
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0
Velocidade crítica (rpm)	55,6
Observações:	

	Alimentação	5 min	10 min
Massa alim pebbles (g)	20.201,90	20.202,30	
P80 (mm)	6,990	1,007	0,200
Torque vazio		-4,53	-4,53
Torque ensaio		88,99	85,25
Potência - Rowland (kW)		0,09	0,09
Potência - Torque (kW)		0,39	0,38
Energia específica - Rowland (kWh/t)		1,36	2,72
Energia específica - Torque (kWh/t)		1,70	3,27
P1000 (%)		79,97	88,16
F1000 (%)		56,44	56,44
% nova de -1,00 mm		23,53	31,72
SSE 1000 Rowland (kwh/t)		5,77	8,56
SSE 1000 Torque (kwh/t)		7,23	10,30
Produto Pebbles (g)		16.900,00	15.740,00
Consumo pebbles (g)		3.301,90	4.462,30
Consumo pebbles (%)		16%	22%
Consumo pebbles (t/h)		0,040	0,027
Consumo pebbles (% do produto)		16,3%	21,1%



Tabela A.22. Moagem primária substituição de 100% - Moinho 2

 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais 	
<b>Jar Test</b>	
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida
Local e Data:	LTM UFRJ
Projeto:	Vale Pebbles
Amostra:	Moagem primária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 100% Pebbles
Jarro:	23"x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras
Diâmetro do jarro (m):	0,5800
Comprimento do jarro (m):	0,2400
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634
Carga do moinho - J (%):	30
Porosidade da carga (%):	40
Volume de vazios carga (mL):	7609
Massa total dos corpos moedores (g):	40.403,6
Porcentagem de bolas	0%
Massa de bolas (g):	0,0
	65 mm = 0,0      50 mm = 0,0      40 mm = 0,0      25 mm = 0,0
Porcentagem de pebbles:	100%
Massa de pebbles (g):	40.403,6
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):	2,52
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14
Massa de polpa (g):	25.911,6
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4
Massa de água (g):	6.737,0
Volume de sólidos (mL):	7.609,0
Sólidos (%):	74
Fração do moinho com sólidos - f <sub>c</sub> (%):	12
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%):	100
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	40,0
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0
Velocidade crítica (rpm)	55,6
Observações:	

	Alimentação	25 min
Massa alim pebbles (g)		40.405,30
P80 (mm)	6,990	0,156
Torque vazio		-4,53
Torque ensaio		60,74
Potência - Rowland (kW)		0,09
Potência - Torque (kW)		0,27
Energia específica - Rowland (kWh/t)		4,25
Energia específica - Torque (kWh/t)		5,94
P1000 (%)		83,84
F1000 (%)		56,44
% nova de -1,00 mm		27,40
SSE 1000 Rowland (kwh/t)		15,51
SSE 1000 Torque (kwh/t)		21,68
Produto Pebbles (g)		33.160,00
Consumo pebbles (g)		7.245,30
Consumo pebbles (%)		18%
Consumo pebbles (t/h)		0,017
Consumo pebbles (% do produto)		31,9%

Tabela A.23. Moagem secundária sem substituição – Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>						
<b>Jar Test</b>						
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)					
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021					
Projeto:	Vale Pebbles					
Amostra:	Alimentação da moagem: (70% IF + 30% IC) -2,35 mm. Pebbles: itabirito compacto					
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox					
Diâmetro do jarro (m):	0,3048					
Comprimento do jarro (m):	0,3048					
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222					
Carga do moinho - J (%):	30					
Porosidade da carga (%):	40					
Volume de vazios carga (mL):	2669					
Massa dos corpos moedores (g):	31.103,9					
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 40% 50 mm/ 45% 40 mm/ 15% 25 mm; Pebbles -2,5+1,0"					
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54					
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57					
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56					
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46					
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12					
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):						
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53					
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14					
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1					
Massa de sólidos (g):	4226,2					
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3					
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9					
Massa de água (g):	1484,9					
Volume de sólidos (mL):	#DIV/0!					
Sólidos (%):	74					
Fração da carga preenchida por polpa (%):	100					
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2					
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%):	72,0					
Velocidade crítica (rpm):	76,6					
Observações:						
	<b>Alimentação</b>	<b>1 min</b>	<b>7 min</b>	<b>10 min</b>		
<b>P95 (mm)</b>	1,81	1,28	0,19	0,14		
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.225,20	4.224,60	4.224,60		
<b>Torque vazio</b>		2,68	2,67	2,62		
<b>Torque ensaio</b>		19,53	19,31	19,39		
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,10	0,10	0,10		
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		0,46	3,21	4,58		
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		0,38	2,66	3,82		
<b>P150 (%)</b>		69,08	91,73	95,83		
<b>F150 (%)</b>		62,98	62,98	62,98		
<b>% nova de -0,150 mm</b>		6,10	28,75	32,85		
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		7,51	11,15	13,95		
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		6,30	9,24	11,64		
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	1	7	10		
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	67	69	92	96		
<b>Tempo para 95% passante em 0,150 mm</b>	9,40	=	9	min	24	seg

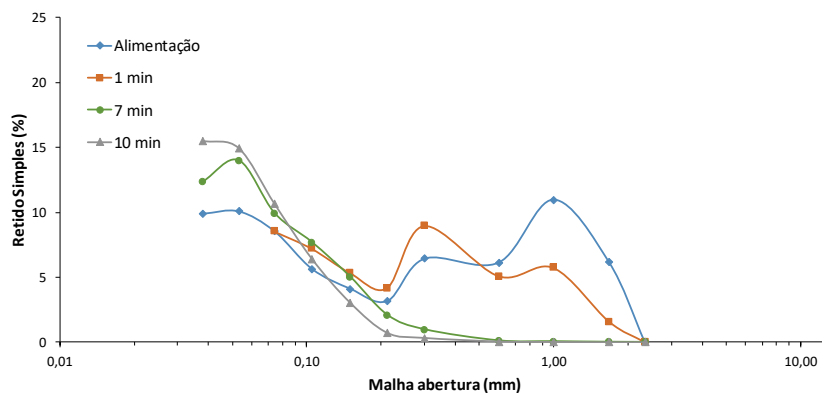
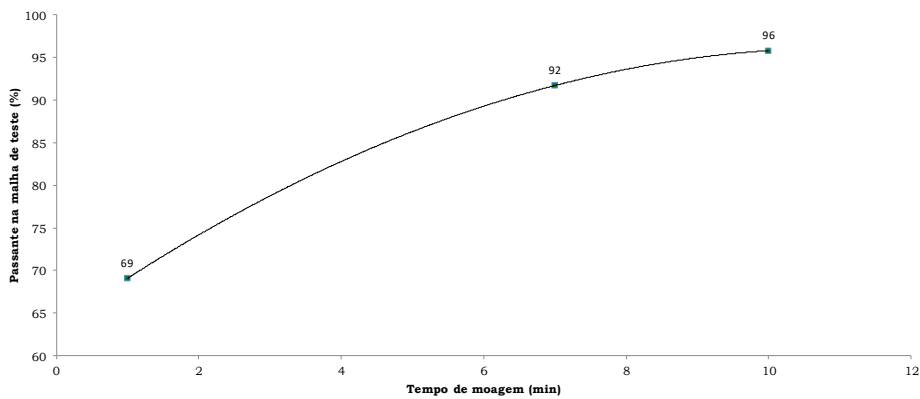
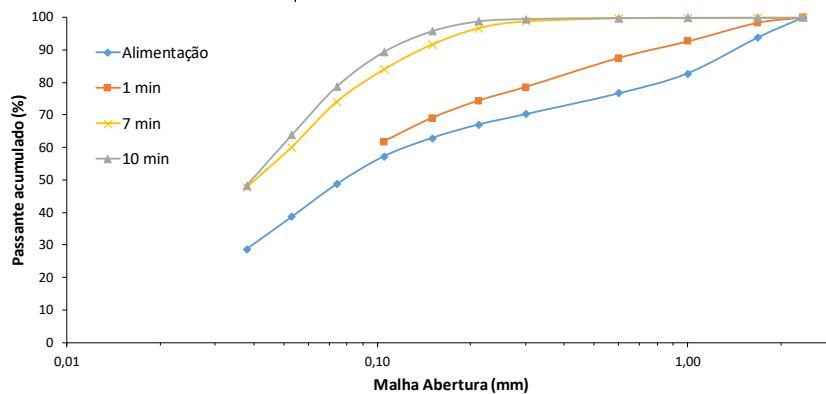




Tabela A.24. Moagem secundária substituição de 10% Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>						
<b>Jar Test</b>						
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)					
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021					
Projeto:	Vale Pebbles					
Amostra:	Alimentação da moagem: (70% IF + 30% IC) -2,35 mm. Pebbles: itabirito compacto					
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox					
Diâmetro do jarro (m):	0,3048					
Comprimento do jarro (m):	0,3048					
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222					
Carga do moinho - J (%):	30					
Porosidade da carga (%):	40					
Volume de vazios carga (mL):	2669					
Massa dos corpos moedores (g):	29.410,6					
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 40% 50 mm/ 45% 40 mm/ 15% 25 mm; Pebbles -2,5+1,0"					
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54					
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57					
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56					
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46					
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12					
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):						
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53					
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14					
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1					
Massa de sólidos (g):	4226,2					
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3					
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9					
Massa de água (g):	1484,9					
Volume de sólidos (mL):	#DIV/0!					
Sólidos (%):	74					
Fração da carga preenchida por polpa (%):	100					
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2					
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%):	72,0					
Velocidade crítica (rpm):	76,6					
Observações:						
	<b>Alimentação</b>	<b>2 min</b>	<b>11 min 30 seg</b>	<b>12 min</b>		
<b>P95 (mm)</b>	1,81	0,81	0,14	0,14		
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.224,30	4.225,00	4.225,30		
<b>Massa sólidos - saída</b>		4.232,50	4.281,20	4.277,10		
<b>Torque vazio</b>		2,71	2,60	2,64		
<b>Torque ensaio</b>		19,43	18,93	18,98		
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,10	0,09	0,09		
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - Entrada</b>		0,43	4,98	5,20		
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - Saída</b>		0,43	4,92	5,13		
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - Entrada</b>		0,76	4,28	4,47		
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - Saída</b>		0,76	4,22	4,41		
<b>F150 (%)</b>		76,04	96,27	96,20		
<b>F150 (%)</b>		62,98	62,98	62,98		
<b>% nova de -0,150 mm</b>		13,07	33,30	33,22		
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		3,31	14,76	15,46		
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		5,82	12,69	13,29		
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	2	11,5	12		
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	67	76	96	96		
Tempo para 95% passante em 0,150 mm	19,71	=	19	min	43	seg



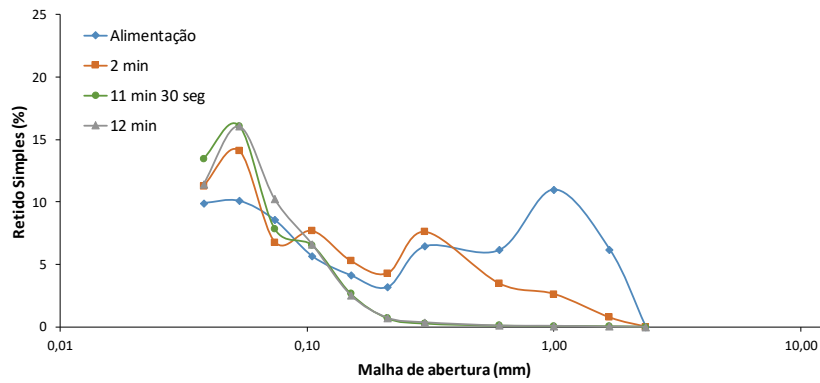
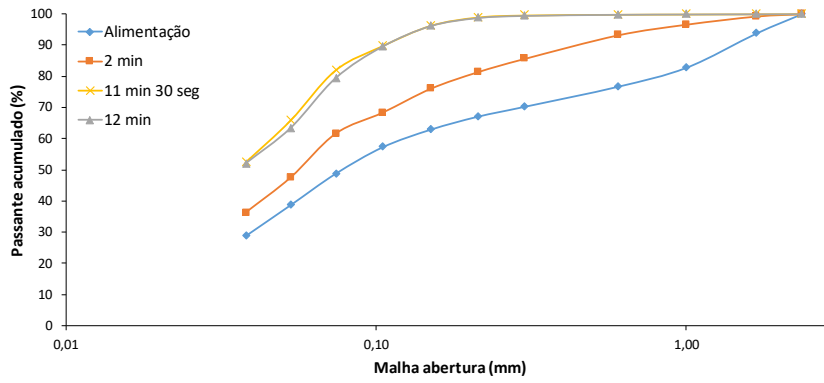




Tabela A.25. Moagem secundária substituição de 50% - Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>			
<b>Jar Test</b>			
Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)		
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Alimentação da moagem: (70% IF + 30% IC) -2,35 mm. Pebbles: itabirito compacto		
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox		
Diâmetro do jarro (m):	0,3048		
Comprimento do jarro (m):	0,3048		
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL):	2669		
Massa dos corpos moedores (g):	22.637,4		
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 40% 50 mm/ 45% 40 mm/ 15% 25 mm; Pebbles -2,5+1,0"		
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54		
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57		
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):			
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53		
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14		
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1		
Massa de sólidos (g):	4226,2		
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3		
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9		
Massa de água (g):	1484,9		
Volume de sólidos (mL):	#DIV/0!		
Sólidos (%):	74		
Fração da carga preenchida por polpa (%):	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%):	72,0		
Velocidade crítica (rpm)	76,6		
Observações:			

	Alimentação	5 min	15 min	20 min
<b>P95 (mm)</b>	1,81	0,49	0,17	0,14
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.224,60	4.225,50	4.224,80
<b>Massa sólidos - saída</b>		4.443,50	4.603,80	4.664,60
<b>Torque vazio</b>		2,61	2,61	2,63
<b>Torque ensaio</b>		16,85	17,31	17,51
<b>Potência - Rowland (kW)</b>		0,09	0,09	0,09
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,08	0,08	0,09
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - Entrada</b>		1,67	5,00	6,67
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - Saída</b>		1,58	4,59	6,04
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - Entrada</b>		1,62	5,02	6,78
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - Saída</b>		1,54	4,61	6,14
<b>P150 (%)</b>		80,23	93,73	96,11
<b>F150 (%)</b>		62,98	62,98	62,98
<b>% nova de -0,150 mm</b>		17,25	30,76	33,13
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		9,19	14,92	18,23
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		8,94	14,99	18,54

	0	5	15	20
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	5	15	20
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	67	80	94	96

Tempo para 95% passante em 0,150 mm	17,66	=	17	min	40	seg
-------------------------------------	-------	---	----	-----	----	-----

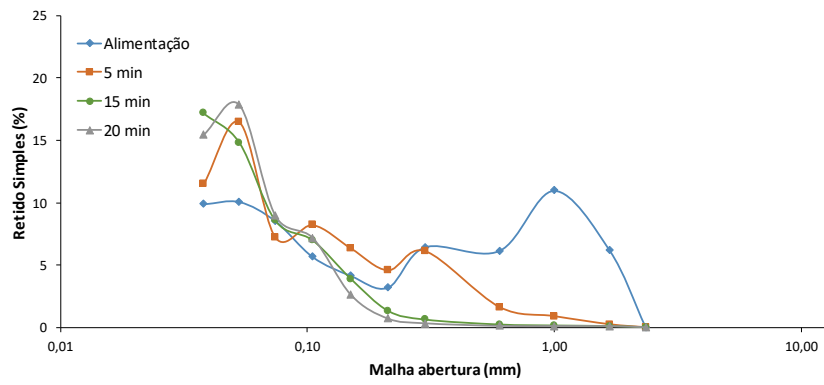
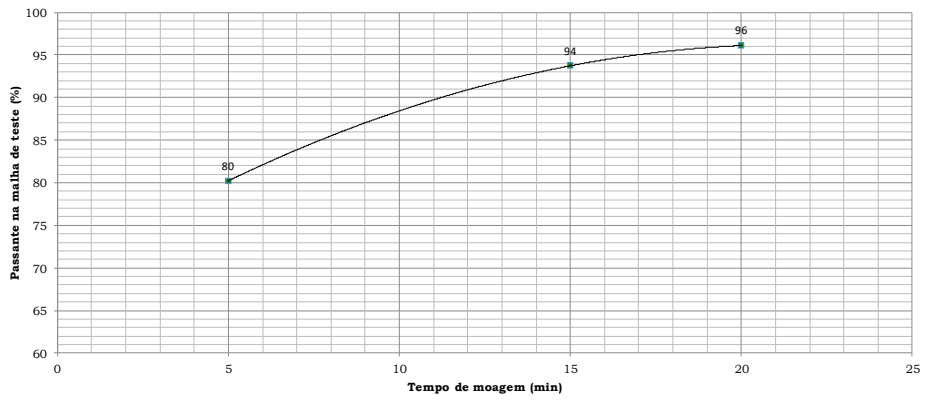
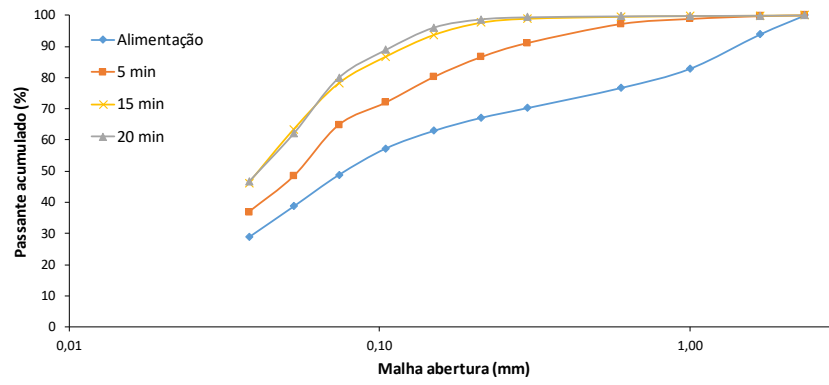




Tabela A.26. Moagem secundária substituição de 100% - Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>			
<b>Jar Test</b>			
Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)		
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Alimentação da moagem: (70% IF + 30% IC) -2,35 mm. Pebbles: itabirito compacto		
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox		
Diâmetro do jarro (m):	0,3048		
Comprimento do jarro (m):	0,3048		
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL):	2669		
Massa dos corpos moedores (g):	14.170,9		
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 40% 50 mm/ 45% 40 mm/ 15% 25 mm; Pebbles -2,5+1,0"		
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54		
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57		
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):			
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53		
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14		
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1		
Massa de sólidos (g):	4226,2		
Massa de Itab. Friável (g):	2958,3		
Massa de Itab. Compacto (g):	1267,9		
Massa de água (g):	1484,9		
Volume de sólidos (mL):	#DIV/0!		
Sólidos (%):	74		
Fração da carga preenchida por polpa (%):	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	55,2		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%):	72,0		
Velocidade crítica (rpm):	76,6		
Observações:			

	Alimentação	10 min	20 min	30 min	30 min otim	35 min
<b>P95 (mm)</b>	1,81	0,59	0,26	0,17	0,16	0,16
<b>Massa sólidos - entrada</b>		4.223,40	4.223,90	4.225,40	3.940,90	4.224,80
<b>Massa sólidos - saída</b>		4.670,80	4.749,90	5.005,70	4.792,90	5.409,80
<b>Torque vazio</b>		2,64	2,63	2,62	2,56	2,62
<b>Torque ensaio</b>		13,87	13,89	14,04	13,23	14,42
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,06	0,07	0,07	0,07	0,07
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - entrada</b>		2,09	4,17	6,26	7,02	7,30
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t) - saída</b>		1,89	3,71	5,28	5,77	5,70
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - entrada</b>		2,56	5,13	7,81	8,25	9,41
<b>Energia específica - Torque (kWh/t) - saída</b>		2,32	4,57	6,59	6,78	7,35
<b>P150 (%)</b>		80,18	88,64	93,73	94,62	94,48
<b>F150 (%)</b>		62,98	62,98	62,98	62,98	62,98
<b>% nova de -0,150 mm</b>		17,20	25,66	30,76	31,64	31,50
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		10,98	14,47	17,18	23,05	18,11
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		13,46	17,79	21,43	26,09	23,34

	0	10	20	30	35
<b>Tempo de moagem (min)</b>		10	20	30	35
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>		67	80	89	94

Tempo para 95% passante em 0,150 mm	38,53	=	38	min	32	seg
-------------------------------------	-------	---	----	-----	----	-----

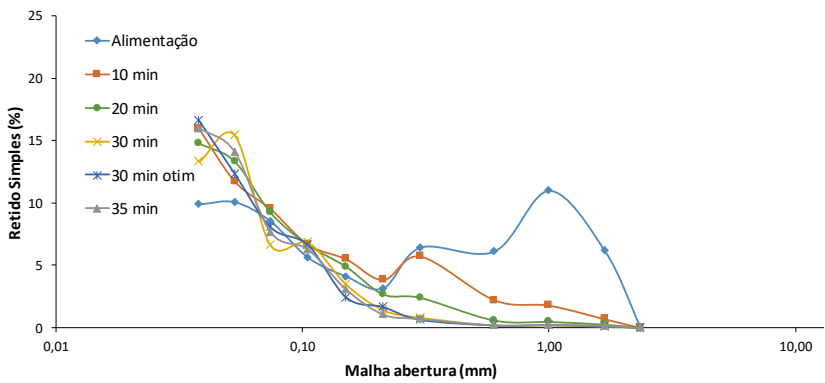
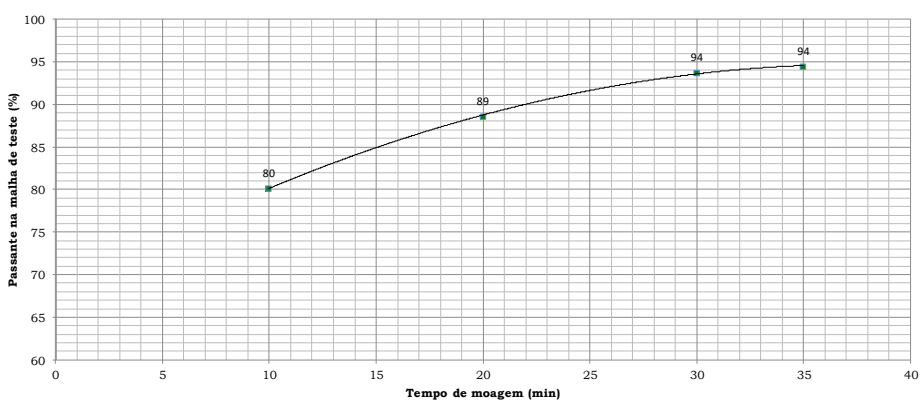
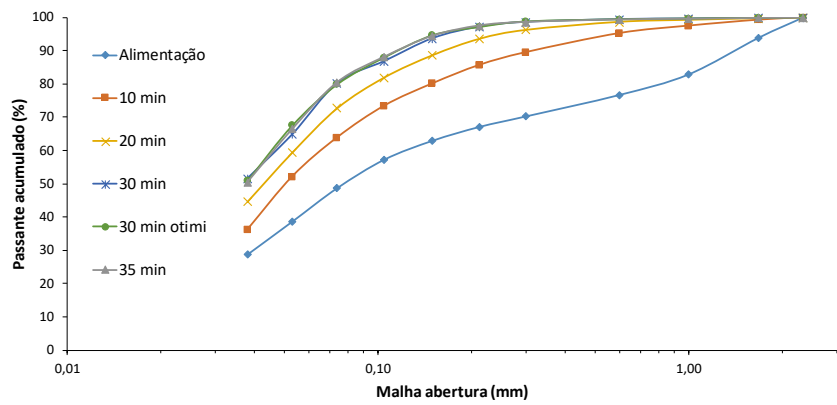




Tabela A.27. Moagem secundária 100% *pebbles* otimizada – Moinho 1

 <b>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</b> <b>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo</b> <b>Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais</b>			
<b>Jar Test</b>			
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches (LTM-USP)		
Local e Data:	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais - 10/2020 a 05/2021		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Alimentação da moagem: (70% IF + 30% IC) -2,35 mm. Pebbles: itabirito compacto		
Jarro:	12x12", revestimento liso de aço inox		
Diâmetro do jarro (m):	0,3048		
Comprimento do jarro (m):	0,3048		
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0222		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL):	2669		
Massa dos corpos moedores (g):	14.170,9		
Tamanho dos corpos moedores	Bolas de aço: 40% 50 mm/ 45% 40 mm/ 15% 25 mm; Pebbles -2,5+1,0"		
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> ):	3,54		
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> ):	3,57		
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> ):	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> ):	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> ):	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> ):			
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> ):	1,53		
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> ):	2,14		
Massa de polpa (g) - preencher vazio com polpa:	5711,1		
Massa de sólidos (g):	3940,6		
Massa de Itab. Friável (g):	2758,4		
Massa de Itab. Compacto (g):	1182,2		
Massa de água (g):	1770,4		
Volume de sólidos (mL):	#DIV/0!		
Sólidos (%):	69		
Fração da carga preenchida por polpa (%):	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	58,2		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	76,0		
Velocidade crítica (rpm)	76,6		
Observações:			
	<b>Alimentação</b>	<b>30 min</b>	
<b>Massa entrada (g)</b>		3.940,63	
<b>Massa saída (g)</b>		4.792,63	
<b>P95 (mm)</b>	1,81	0,16	
<b>Torque vazio</b>		2,56	
<b>Torque ensaio</b>		13,23	
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,07	
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		7,29	
<b>Energia específica - Torque entrada (kWh/t)</b>		8,26	
<b>Energia específica - Torque saída (kWh/t)</b>		6,79	
<b>P150 (%)</b>		94,62	
<b>F150 (%)</b>		62,98	
<b>% nova de -0,150 mm</b>		31,64	
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		23,05	
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		26,09	
<b>Tempo de moagem (min)</b>	0	30	
<b>Passante 1,00 mm (%)</b>	67	95	
Tempo para 95% passante em 0,150 mm	30,00	=	30 min 0 seg

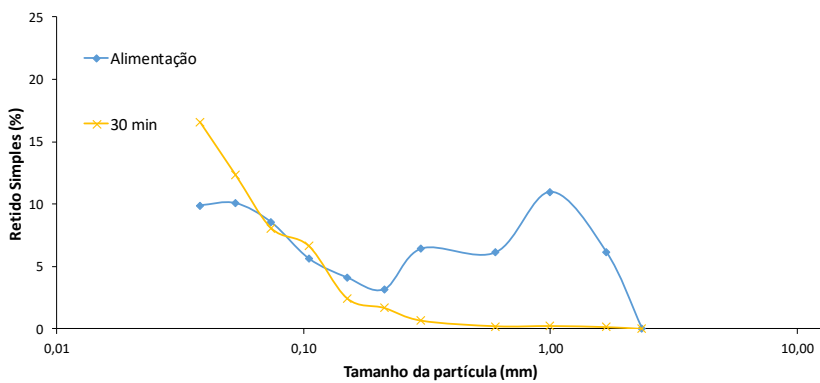
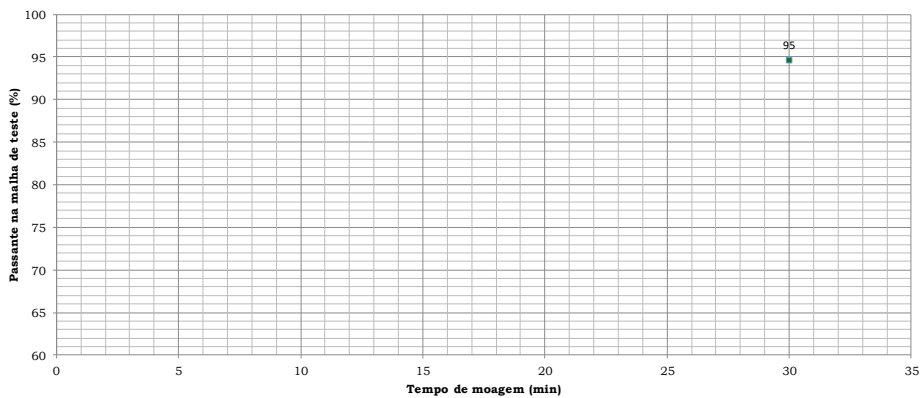
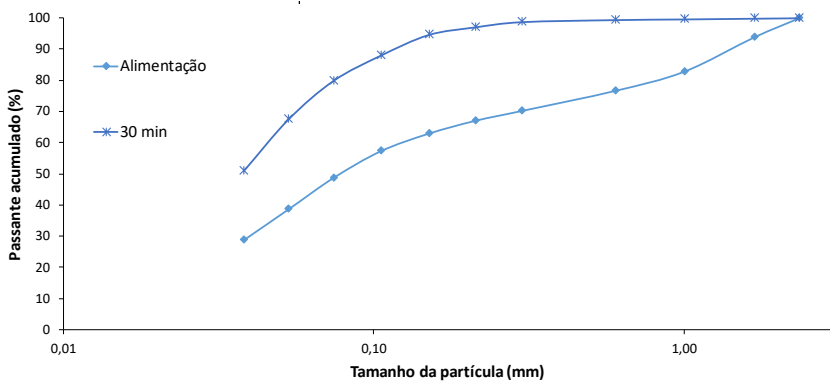


Tabela A.28. Moagem secundária sem substituição – Moinho 2



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



## Jar Test

Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida		
Local e Data:	LTM UFRJ		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Moagem secundária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 100% Bolas		
Jarro:	23'x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras		
Diâmetro do jarro (m):	0,5800		
Comprimento do jarro (m):	0,2400		
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL)	7609		
Massa total dos corpos moedores (g):	88.682,5		
Porcentagem de bolas	100%		
Massa de bolas (g):	88.682,5		
	50 mm = 35.473,0	40 mm = 39.907,1	25 mm = 13.302,4
Porcentagem de pebbles:	0%		
Massa de pebbles (g):	0,0		
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54		
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57		
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )	2,52		
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53		
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14		
Massa de polpa (g)	25.911,6		
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com polpa:	19.174,6		
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2		
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4		
Massa de água (g):	6.737,0		
Volume de sólidos (mL)	7.609,0		
Sólidos (%)	74		
Fração do moinho com sólidos - f <sub>c</sub> (%)	12		
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%)	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	40,0		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0		
Velocidade crítica (rpm)	55,6		
Observações:			

	Alimentação	12 min
P80 (mm)	1,839	0,145
Torque vazio		-4,53
Torque ensaio		118,84
Potência - Rowland (kW)		0,09
Potência - Torque (kW)		0,52
Energia específica - Rowland (kWh/t)		4,48
Energia específica - Torque (kWh/t)		5,39
P150 (%)		95,69
F150 (%)		59,27
% nova de -0,150 mm		36,42
SSE 150 Rowland (kwh/t)		12,30
SSE 150 Torque (kwh/t)		14,80



Tabela A.29. Moagem secundária substituição de 25% Moinho 2



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais





## Jar Test

Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida		
Local e Data:	LTM UFRJ		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Moagem secundária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 75% Bolas + 75% Pebbles		
Jarro:	23'x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras		
Diâmetro do jarro (m):	0,5800		
Comprimento do jarro (m):	0,2400		
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL)	7609		
Massa total dos corpos moedores (g):	76.612,8		
Porcentagem de bolas	75%		
Massa de bolas (g):	66.511,9		
	50 mm = 26.604,7	40 mm = 29.930,3	25 mm = 9.976,8
Porcentagem de pebbles:	50%		
Massa de pebbles (g):	10.100,9		
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54		
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57		
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )	2,52		
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53		
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14		
Massa de polpa (g)	25.911,6		
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6		
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2		
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4		
Massa de água (g):	6.737,0		
Volume de sólidos (mL)	7.609,0		
Sólidos (%)	74		
Fração do moinho com sólidos - f <sub>c</sub> (%)	12		
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%)	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	40,0		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0		
Velocidade crítica (rpm)	55,6		
Observações:			

	Alimentação	16 min
<b>Massa alim pebbles (g)</b>		10.105,00
<b>P80 (mm)</b>	1,839	0,146
<b>Torque vazio</b>		-4,53
<b>Torque ensaio</b>		88,71
<b>Potência - Rowland (kW)</b>		0,09
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,39
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		5,16
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		5,43
<b>P150 (%)</b>		95,72
<b>F150 (%)</b>		59,27
<b>% nova de -0,150 mm</b>		36,45
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		14,15
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		14,90
<b>Produto Pebbles (g)</b>		8.560,00
<b>Consumo pebbles (g)</b>		1.545,00
<b>Consumo pebbles (%)</b>		15%
<b>Consumo pebbles (t/h)</b>		0,006
<b>Consumo pebbles (% do produto)</b>		7,7%

Tabela A.30. Moagem secundária substituição de 50% - Moinho 2

 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais 			
<b>Jar Test</b>			
Responsável:	Maurício Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida		
Local e Data:	LTM UFRJ		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Moagem secundária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 50% Bolas + 50% Pebbles		
Jarro:	23'x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras		
Diâmetro do jarro (m):	0,5800		
Comprimento do jarro (m):	0,2400		
Volume do jarro (m <sup>3</sup> ):	0,0634		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL)	7609		
Massa total dos corpos moedores (g):	64.543,0		
Porcentagem de bolas	50%		
Massa de bolas (g):	44.341,2		
	50 mm = 17.736,5	40 mm = 19.953,6	25 mm = 6.651,2
Porcentagem de pebbles:	50%		
Massa de pebbles (g):	20.201,8		
Massa específica IC (g/cm <sup>3</sup> )	3,54		
Massa específica IF (g/cm <sup>3</sup> )	3,57		
Massa específica Blend (g/cm <sup>3</sup> )	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm <sup>3</sup> )	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm <sup>3</sup> )	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm <sup>3</sup> )	2,52		
Densidade aparente Pebble (g/cm <sup>3</sup> )	1,53		
Densidade de polpa (g/cm <sup>3</sup> )	2,14		
Massa de polpa (g)	25.911,6		
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6		
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2		
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4		
Massa de água (g):	6.737,0		
Volume de sólidos (mL)	7.609,0		
Sólidos (%)	74		
Fração do moinho com sólidos - $f_c$ (%)	12		
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%)	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	40,0		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0		
Velocidade crítica (rpm)	55,6		
Observações:			

	Alimentação	15 min	25 min
<b>Massa alim pebbles (g)</b>		20.203,90	20.201,70
<b>P80 (mm)</b>	1,839	0,211	0,142
<b>Torque vazio</b>		-4,53	-4,53
<b>Torque ensaio</b>		83,44	78,18
<b>Potência - Rowland (kW)</b>		0,09	0,09
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,37	0,35
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		4,07	6,79
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		4,80	7,53
<b>P150 (%)</b>		91,47	96,02
<b>F150 (%)</b>		59,27	59,27
<b>% nova de -0,150 mm</b>		32,20	36,75
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		12,65	18,47
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		14,92	20,48
<b>Produto Pebbles (g)</b>		15.480,00	15.300,00
<b>Consumo pebbles (g)</b>		4.723,90	4.901,70
<b>Consumo pebbles (%)</b>		23,4%	24,3%
<b>Consumo pebbles (t/h)</b>		0,019	0,012
<b>Consumo pebbles (% do produto)</b>		22,8%	22,7%

Tabela A.31. Moagem secundária substituição de 100% - Moinho 2



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



## Jar Test

Responsável:	Mauricio Bergerman / Júlia Guimarães Sanches / Rodrigo de Almeida		
Local e Data:	LTM UFRJ		
Projeto:	Vale Pebbles		
Amostra:	Moagem secundária. Alimentação: 70% IF + 30% IC. Corpo moedor: 100% Pebbles		
Jarro:	23'x 9,5", revestimento com 8 barras levantadoras		
Diâmetro do jarro (m):	0,5800		
Comprimento do jarro (m):	0,2400		
Volume do jarro (m3):	0,0634		
Carga do moinho - J (%):	30		
Porosidade da carga (%):	40		
Volume de vazios carga (mL)	7609		
Massa total dos corpos moedores (g):	40.403,6		
Porcentagem de bolas	0%		
Massa de bolas (g):	0,0		
	50 mm = 0,0	40 mm = 0,0	25 mm = 0,0
Porcentagem de pebbles:	100%		
Massa de pebbles (g):	40.403,6		
Massa específica IC (g/cm3)	3,54		
Massa específica IF (g/cm3)	3,57		
Massa específica Blend (g/cm3)	3,56		
Densidade aparente IC (g/cm3)	2,46		
Densidade aparente IF (g/cm3)	2,12		
Densidade aparente Blend alimentação moagem (g/cm3)	2,52		
Densidade aparente Pebble (g/cm3)	1,53		
Densidade de polpa (g/cm3)	2,14		
Massa de polpa (g)	25.911,6		
Massa de sólidos (g) - preencher vazios com sólidos:	19.174,6		
Massa de Itab. Friável (g):	13.422,2		
Massa de Itab. Compacto (g):	5.752,4		
Massa de água (g):	6.737,0		
Volume de sólidos (mL)	7.609,0		
Sólidos (%)	74		
Fração do moinho com sólidos - $f_c$ (%)	12		
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%)	100		
Velocidade de rotação (rpm) - sem considerar bolas	40,0		
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	72,0		
Velocidade crítica (rpm)	55,6		
Observações:			

	Alimentação	30 min	60 min	90 min
<b>Massa alim pebbles (g)</b>		40.403,20	40.403,20	40.403,20
<b>P80 (mm)</b>	1,434	0,189	0,179	0,177
<b>Torque vazio</b>		-4,53	-4,53	-4,53
<b>Torque ensaio</b>		60,48	48,11	41,74
<b>Potência - Rowland (kW)</b>		0,09	0,09	0,09
<b>Potência - Torque (kW)</b>		0,27	0,22	0,19
<b>Energia específica - Rowland (kWh/t)</b>		5,10	10,20	15,30
<b>Energia específica - Torque (kWh/t)</b>		7,10	11,50	15,16
<b>P150 (%)</b>		92,58	93,12	93,29
<b>F150 (%)</b>		67,50	67,50	67,50
<b>% nova de -0,150 mm</b>		25,09	25,63	25,79
<b>SSE 150 Rowland (kwh/t)</b>		20,33	39,80	59,32
<b>SSE 150 Torque (kwh/t)</b>		28,31	44,87	58,78
<b>Produto Pebbles (g)</b>		34.330,00	33.605,00	31.465,00
<b>Consumo pebbles acumulado(g)</b>		6.073,20	6.798,20	8.938,20
<b>Consumo pebbles simples(g)</b>		6.073,20	725,00	2.140,00
<b>Consumo pebbles (%)</b>		15%	17%	22%
<b>Consumo pebbles (t/h)</b>		0,012	0,007	0,006
<b>Consumo pebbles (% do produto)</b>		27,6%	3,6%	10,9%

## APÊNDICE G - Medição de torque

Tabela A.32. Moagem primária sem substituição - tempo de moagem de 3 min 30 seg – Moinho 1

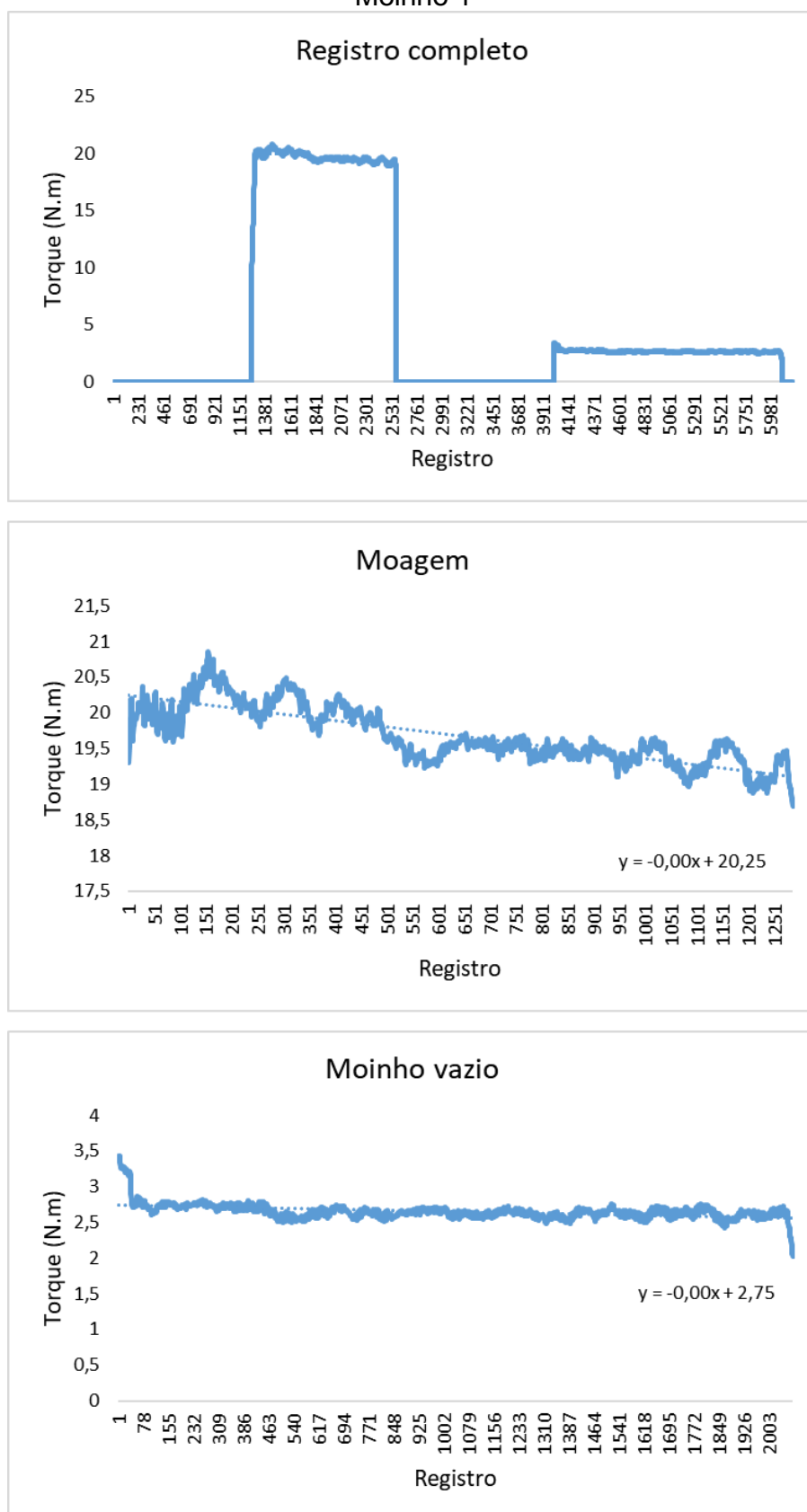
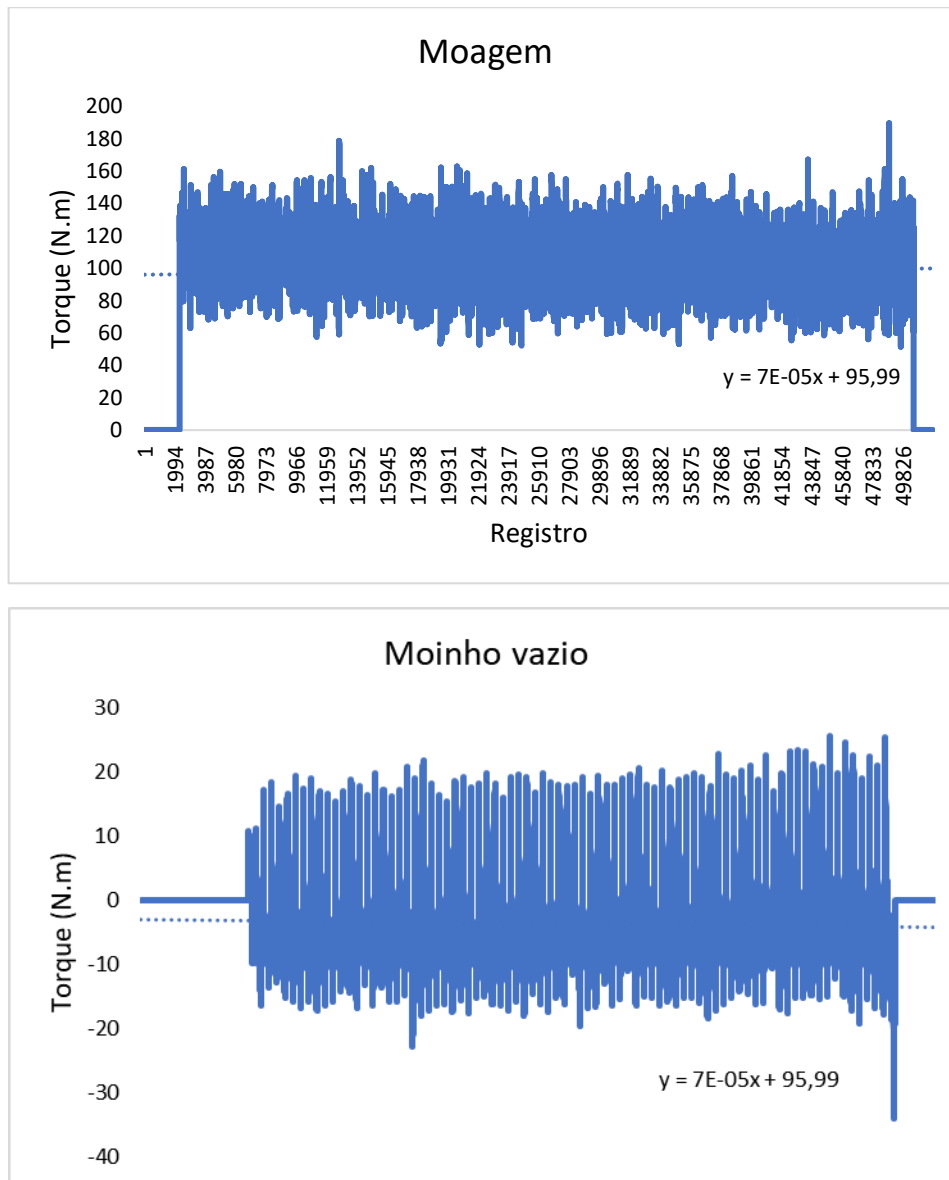


Tabela A.33. Moagem primária sem substituição - tempo de moagem de 4 min – Moinho 2



## **ANEXOS**

## ANEXO A - Resultados das análises química e mineralógica itabirito friável e compacto

Tabela B.1. Identificação da amostra

Fração ( $\mu\text{m}$ )	ID Recebimento
+1000	IF
-1000+500	
-500+210	
-210+150	
-150+0,075	
-0,075+0,045	
-0,045	
Global Calculada	

Tabela B.2. Análise química itabirito friável

Análise Química (%)								
Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
64,08	7,02	0,026	0,68	0,010	0,047	0,015	0,094	0,64
58,32	13,97	0,028	0,62	0,010	0,046	0,019	0,063	0,83
36,79	45,13	0,022	0,51	0,011	0,037	0,010	0,079	0,66
20,49	68,84	0,012	0,24	0,010	0,035	0,010	0,041	0,51
16,61	74,85	0,010	0,22	0,010	0,035	0,010	0,061	0,32
25,93	61,08	0,010	0,37	0,010	0,032	0,015	0,111	0,33
49,05	26,60	0,025	1,91	0,010	0,045	0,017	0,086	1,00
39,30	41,59	0,02	0,90	0,01	0,04	0,01	0,08	0,64

Tabela B.3. Retido simples por malha do itabirito friável

% Retido Simples
14,89
4,50
5,43
4,70
16,88
21,28
32,31
100,00

Tabela B.4. Análise mineralógica itabirito friável

Quantificação Mineralógica (%)																					
HE	HL	HG	HMic	HS	HC	HM	MA	GANf	Galv	GMac	GO	GT	QL	QM	QZ	MN	CA	GB	MI	OT	Porosidade
25,59	22,41	8,47	0,00	29,98	86,46	3,14	0,37	0,00	0,00	1,50	1,50	0,05	4,66	2,24	6,90	0,00	0,00	0,14	0,00	1,43	31,20
22,38	33,29	10,02	0,00	16,93	82,61	1,84	0,31	0,00	0,00	0,96	0,96	0,08	6,97	6,76	13,72	0,26	0,00	0,20	0,00	0,00	30,00
17,61	15,36	4,67	0,00	12,72	50,37	1,75	0,32	0,00	0,00	3,21	3,21	0,36	39,96	3,83	43,79	0,00	0,00	0,19	0,00	0,02	28,80
7,42	11,28	4,22	0,00	7,08	30,00	0,76	0,15	0,00	0,00	1,28	1,28	0,00	66,94	0,77	67,71	0,00	0,07	0,04	0,00	0,00	25,00
6,97	11,08	3,76	0,00	3,06	24,88	0,11	0,02	0,00	0,00	1,08	1,08	0,13	73,26	0,37	73,63	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	22,40
21,59	13,43	2,85	0,00	0,85	38,73	0,14	0,05	0,00	0,00	0,40	0,40	0,02	60,43	0,20	60,63	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	6,20
36,53	21,84	11,25	0,00	0,12	69,73	0,00	0,08	0,00	0,00	2,30	2,30	0,70	27,05	0,08	27,13	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	4,56
23,70	17,99	7,04	0,00	6,99	55,71	0,73	0,13	0,00	0,00	1,51	1,51	0,28	40,30	1,01	41,31	0,01	0,01	0,09	0,00	0,21	15,31

Figura B.1. Legenda das siglas da quantificação mineralógica

**Legenda**

HL = Hematita Lamelar	HS = Hematita Sinuosa	GANf = Goethita Anibolítica	QL = Quartzo Livre	GB = Gibbsita
HE = Hematita Especular	HC's = Hematitas compactas	GMac = Goethita Maciça	QM = Quartzo Misto	OT = Outros minerais
HG = Hematita Granular	HM = Hematita martítica	GO = Goethita	MN = Óxido de manganês	GCom = Goethita Compacta
HMic = Hematita Microcristalina	MA = Magnetita	GT = Goethita Terrosa	CA = Caulinita	



Tabela B.5. Análise química por mineral do itabirito friável

Distribuição Química por Mineral (%)											
HC	Fe			SiO <sub>2</sub>					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		GB
	HM	MA	GO+GT	QL	QM	GT	CA	GT	CA		
94,61	3,44	0,42	1,53	67,54	32,43	0,03	0,00	3,57	0,00	96,43	
96,38	2,14	0,38	1,10	50,76	49,21	0,02	0,00	4,17	0,00	95,83	
90,49	3,14	0,59	5,77	91,23	8,73	0,03	0,00	16,90	0,00	83,10	
93,57	2,36	0,47	3,60	98,82	1,14	0,00	0,05	0,00	48,95	51,05	
95,32	0,43	0,08	4,17	99,49	0,50	0,01	0,00	8,57	0,00	91,43	
98,55	0,37	0,12	0,96	99,66	0,33	0,00	0,01	7,30	24,01	68,68	
96,16	0,00	0,11	3,73	99,61	0,29	0,10	0,00	55,84	0,00	44,16	
95,73	1,26	0,23	2,78	97,52	2,45	0,03	0,01	24,20	2,55	73,26	

Tabela B.6. Distribuição das hematitas no itabirito friável

Distribuição das Hematitas (%)						
HE	HL	HG	HMic	HS	HC	HM
28,56	25,01	9,45	0,00	33,46	96,49	3,51
26,50	39,42	11,86	0,00	20,04	97,83	2,17
33,78	29,48	8,96	0,00	24,41	96,64	3,36
24,13	36,66	13,73	0,00	23,01	97,54	2,46
27,89	44,35	15,05	0,00	12,26	99,55	0,45
55,55	34,55	7,34	0,00	2,19	99,63	0,37
52,39	31,32	16,13	0,00	0,17	100,00	0,00
41,99	31,87	12,47	0,00	12,38	98,71	1,29

Figura B.2. Quantificação mineralógica do itabirito friável

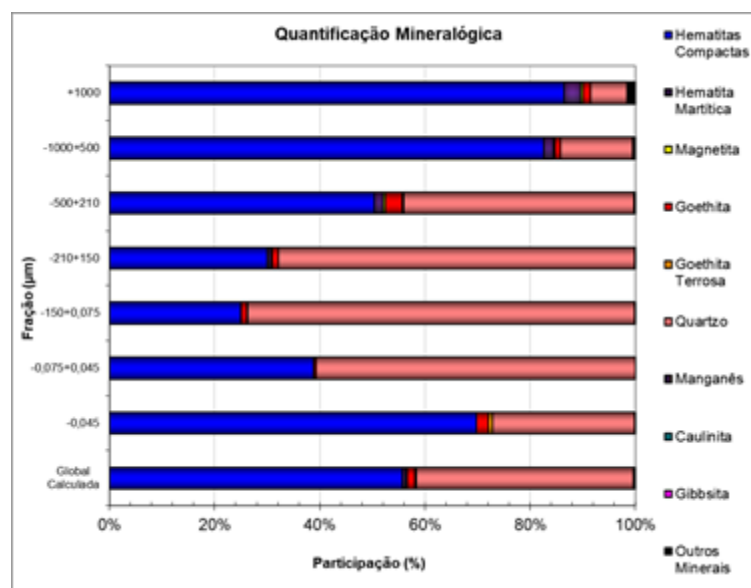


Figura B.3. Distribuição dos minerais ferruginosos do itabirito friável

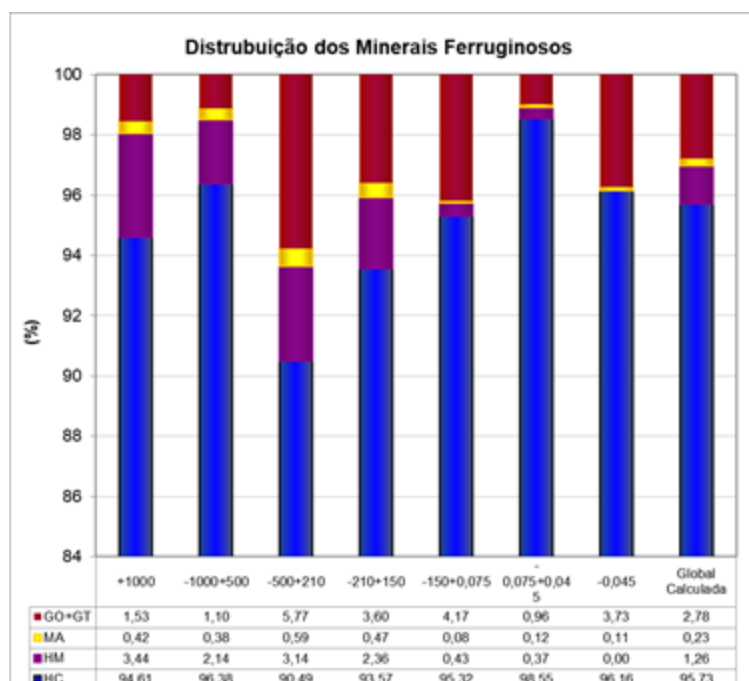


Figura B.4. Distribuição das hematitas do itabirito friável

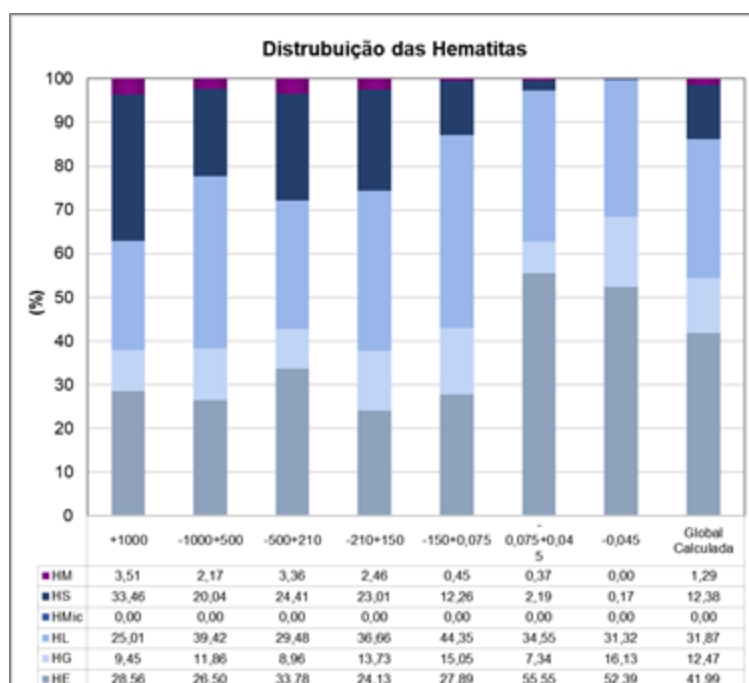


Figura B.5. Distribuição da sílica por mineral do itabirito friável

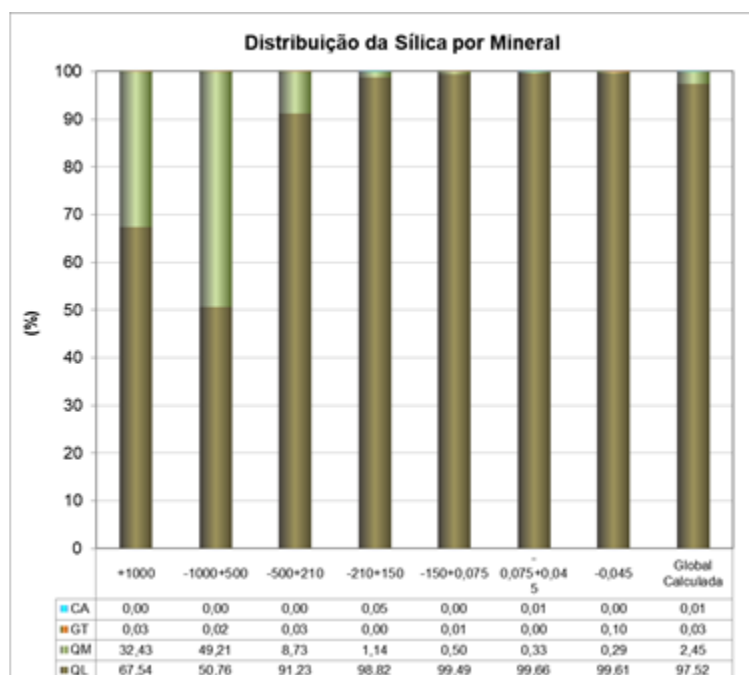


Figura B.6. Distribuição da alumina por mineral do itabirito friável

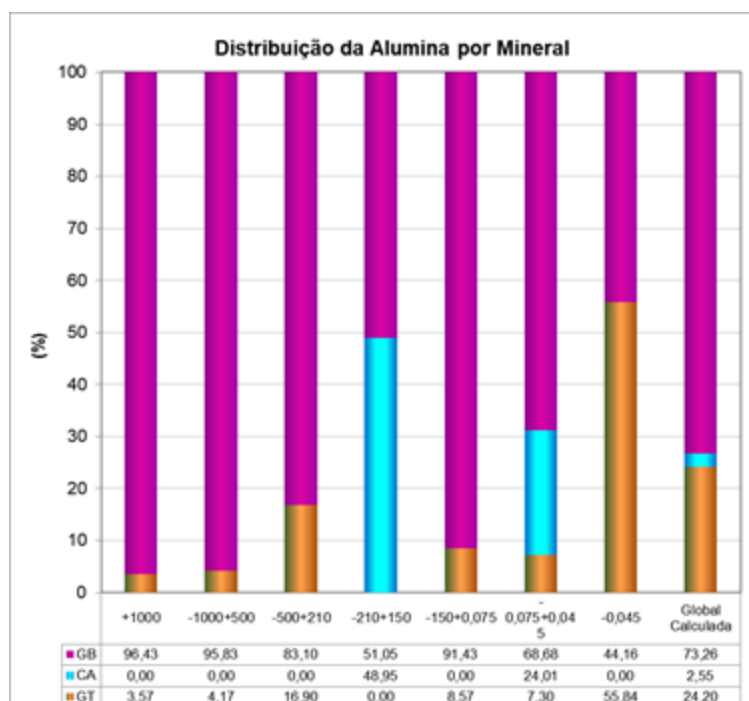
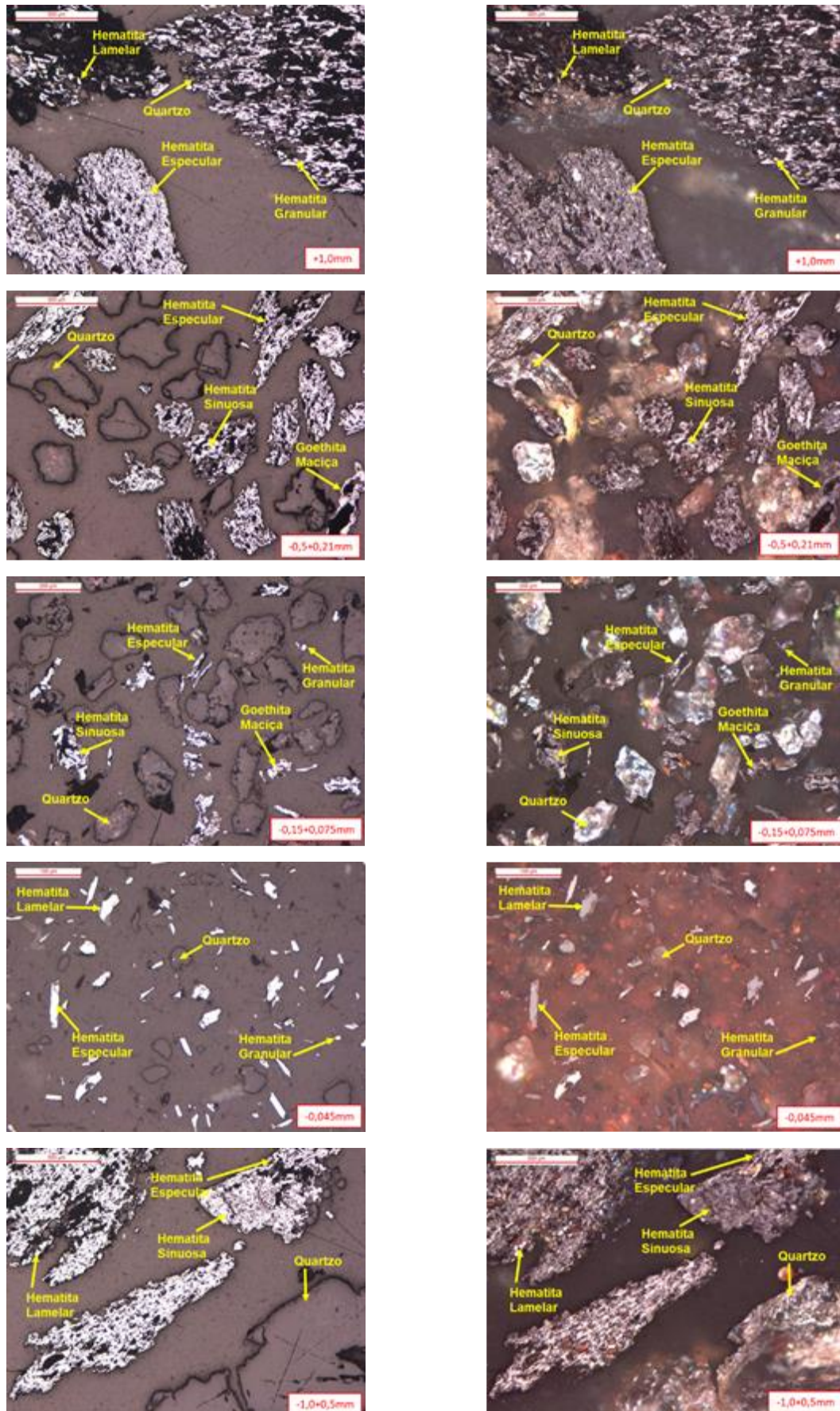


Figura B.7. Fotomicrografias do itabirito friável



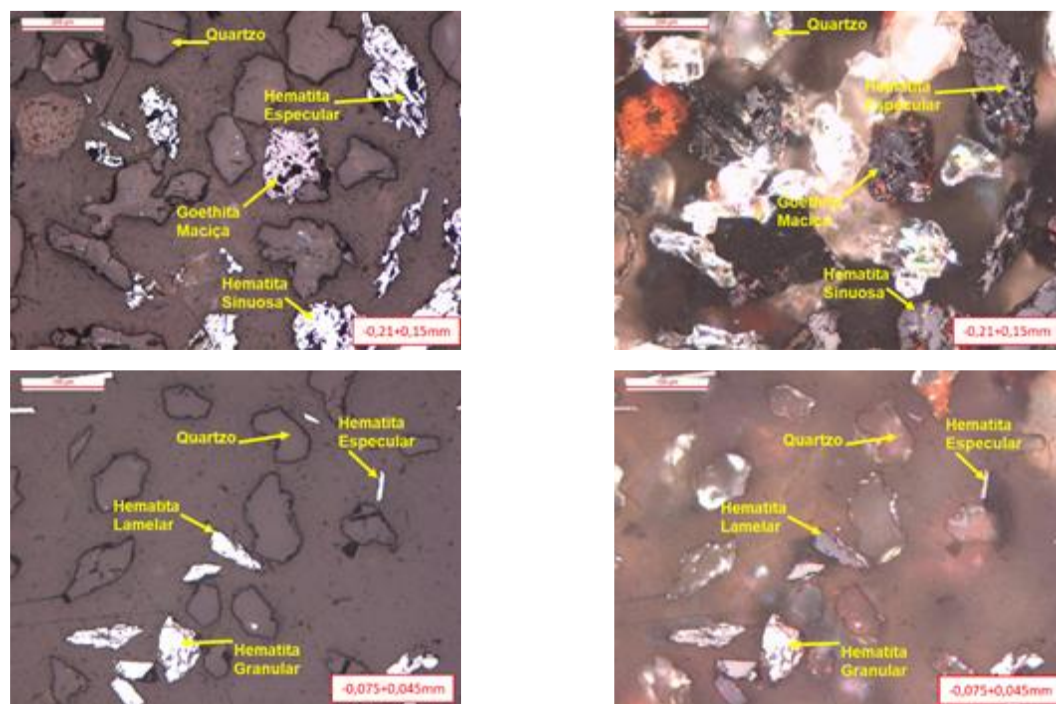


Tabela B.7. Identificação de amostra do itabirito compacto

Fração ( $\mu\text{m}$ )	ID Recebimento
+1000	IC
-1000+500	
-500+210	
-210+150	
-150+0,075	
-0,075+0,045	
-0,045	
Global Calculada	

Tabela B.8. Análise química do itabirito compacto

Análise Química (%)								
Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
42,44	37,56	0,026	0,20	0,010	0,033	0,010	0,066	0,46
43,28	36,69	0,029	0,26	0,010	0,042	0,010	0,065	0,54
42,62	37,06	0,035	0,33	0,020	0,045	0,027	0,086	0,76
37,73	44,05	0,033	0,33	0,026	0,048	0,094	0,088	0,75
23,33	64,87	0,019	0,29	0,016	0,041	0,020	0,076	0,45
18,89	71,37	0,014	0,21	0,010	0,036	0,016	0,051	0,44
40,00	40,94	0,027	0,65	0,012	0,049	0,044	0,087	0,64
39,08	42,38	0,03	0,31	0,01	0,04	0,02	0,07	0,53

Tabela B.9. Retido simples por malha do itabirito compacto

---

<b>% Retido Simples</b>	
	47,79
	11,65
	5,62
	1,99
	5,43
	7,90
	19,63
	100,00

---

Tabela B.10. Análise mineralógica do itabirito compacto

Quantificação Mineralógica (%)																					
HE	HL	HG	HMic	HS	HC	HM	MA	GAnf	Galv	GMac	GO	GT	QL	QM	QZ	MN	CA	GB	MI	OT	Porosidade
11,17	24,78	4,90	0,00	17,82	58,67	0,00	0,54	0,00	0,00	1,64	1,64	0,00	2,74	36,41	39,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,40
11,92	18,89	8,90	0,00	17,46	57,16	0,00	2,43	0,00	0,00	3,96	3,96	0,00	0,93	35,49	36,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	26,60
10,37	21,44	5,24	0,00	19,64	56,69	0,41	1,38	0,00	0,00	4,05	4,05	0,00	2,55	34,84	37,39	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	30,60
8,54	14,08	5,38	0,00	22,51	50,51	0,36	0,53	0,00	0,00	5,17	5,17	0,00	16,74	26,50	43,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	25,80
5,01	10,97	5,52	0,00	11,34	32,84	0,31	0,77	0,00	0,00	2,66	2,66	0,00	58,01	5,18	63,18	0,00	0,00	0,05	0,00	0,19	23,00
7,82	12,41	4,13	0,00	3,07	27,43	0,09	0,31	0,00	0,00	1,27	1,27	0,00	69,07	1,61	70,68	0,00	0,04	0,00	0,00	0,19	12,92
15,04	29,42	11,51	0,00	0,57	56,55	0,00	0,10	0,00	0,00	3,79	3,79	0,25	38,75	0,48	39,23	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	4,48
11,32	22,88	6,67	0,00	13,07	53,94	0,05	0,71	0,00	0,00	2,56	2,56	0,05	18,11	24,52	42,63	0,00	0,01	0,02	0,00	0,03	19,66

Figura B.8. Legenda das siglas da quantificação mineralógica

**Legenda**

HL = Hematita Lamelar	HS = Hematita Sinuosa	GAnf = Goethita Anibolítica	QL = Quartzo Livre	GB = Gibbsita
HE = Hematita Especular	HC's = Hematitas compactas	GMac = Goethita Maciça	QM = Quartzo Misto	OT = Outros minerais
HG = Hematita Granular	HM = Hematita martítica	GO = Goethita	MN = Óxido de manganês	GCom = Goethita Compacta
HMic = Hematita Microcristalina	MA = Magnetita	GT = Goethita Terrosa	CA = Caulinita	

Tabela B.11. Distribuição química por mineral do itabirito compacto

Distribuição Química por Mineral (%)										
HC	Fe			SiO <sub>2</sub>				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		GB
	HM	MA	GO+GT	QL	QM	GT	CA	GT	CA	
96,66	0,00	0,91	2,43	7,01	92,99	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
90,38	0,00	3,98	5,64	2,56	97,44	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
91,19	0,65	2,30	5,86	6,83	93,17	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
90,09	0,63	0,98	8,30	38,72	61,28	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
90,37	0,85	2,20	6,58	91,81	8,19	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
94,66	0,31	1,09	3,94	97,69	2,28	0,00	0,02	0,00	100,00	0,00
93,81	0,00	0,17	6,03	98,70	1,23	0,02	0,04	28,40	24,30	47,30
94,50	0,09	1,29	4,12	42,47	57,51	0,00	0,01	18,72	22,35	58,93

Tabela B.12. Distribuição das hematitas do itabirito compacto

Distribuição das Hematitas (%)						
HE	HL	HG	HMic	HS	HC	HM
19,04	42,24	8,35	0,00	30,37	100,00	0,00
20,84	33,04	15,58	0,00	30,54	100,00	0,00
18,16	37,56	9,17	0,00	34,40	99,29	0,71
16,78	27,69	10,57	0,00	44,26	99,30	0,70
15,11	33,09	16,66	0,00	34,21	99,07	0,93
28,42	45,09	15,02	0,00	11,14	99,68	0,32
26,60	52,03	20,35	0,00	1,02	100,00	0,00
20,97	42,38	12,35	0,00	24,21	99,90	0,10

Figura B.9. Quantificação mineralógica do itabirito compacto

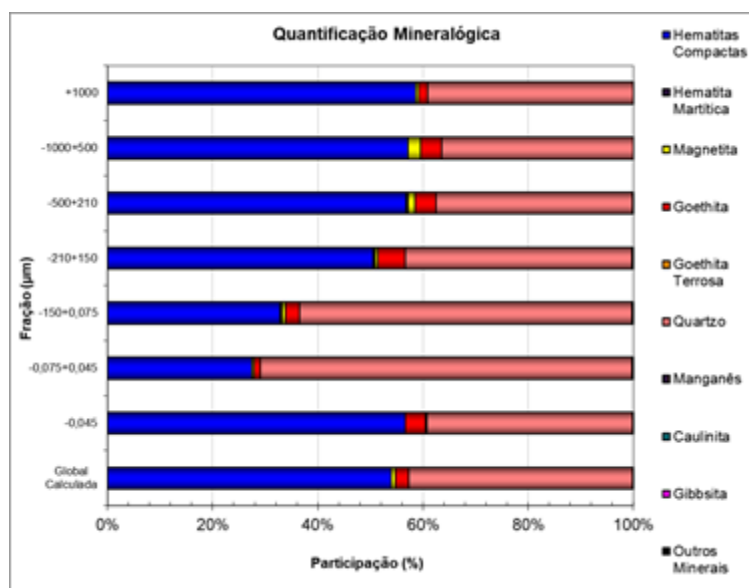




Figura B.10. Distribuição dos minerais ferruginosos do itabirito compacto

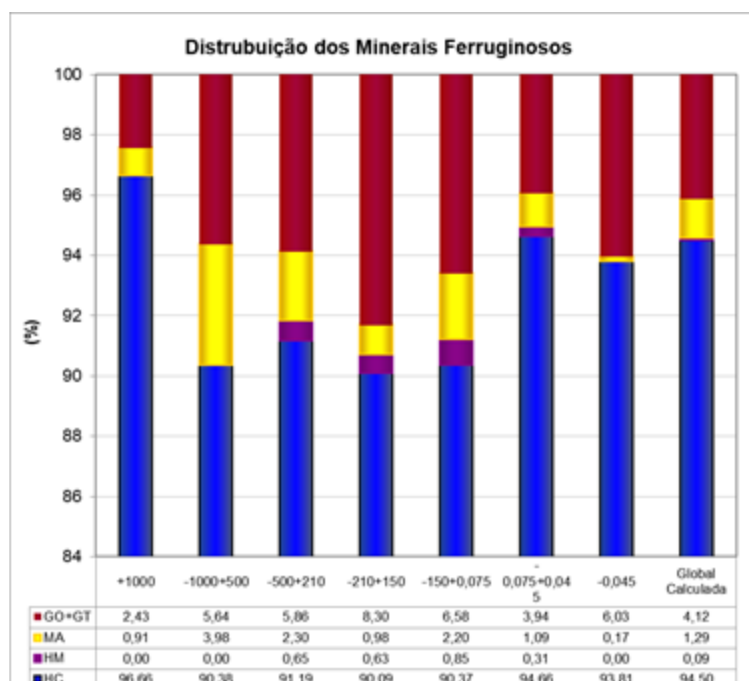


Figura B.11. Distribuição das hematitas do itabirito compacto

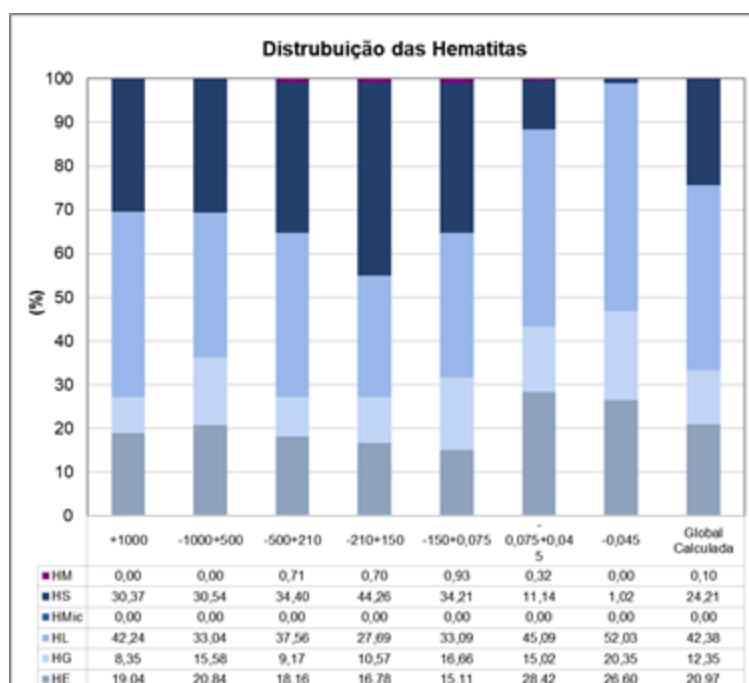


Figura B.12. Distribuição da sílica por mineral do itabirito compacto

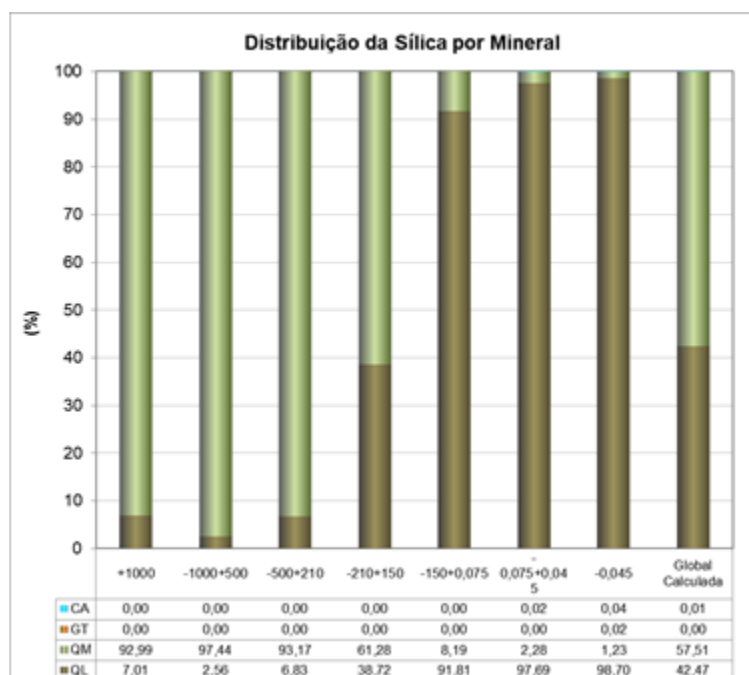


Figura B.13. Distribuição da alumina por mineral do itabirito compacto

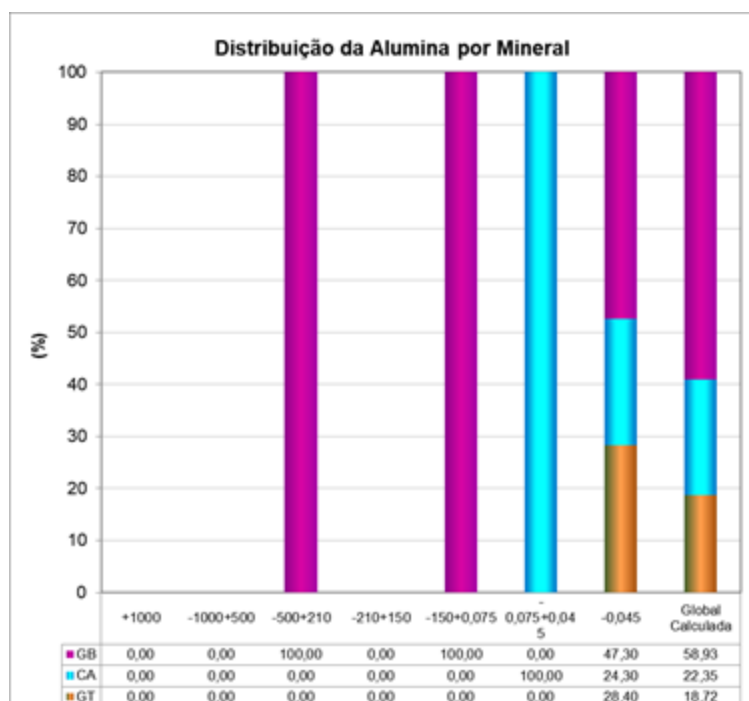
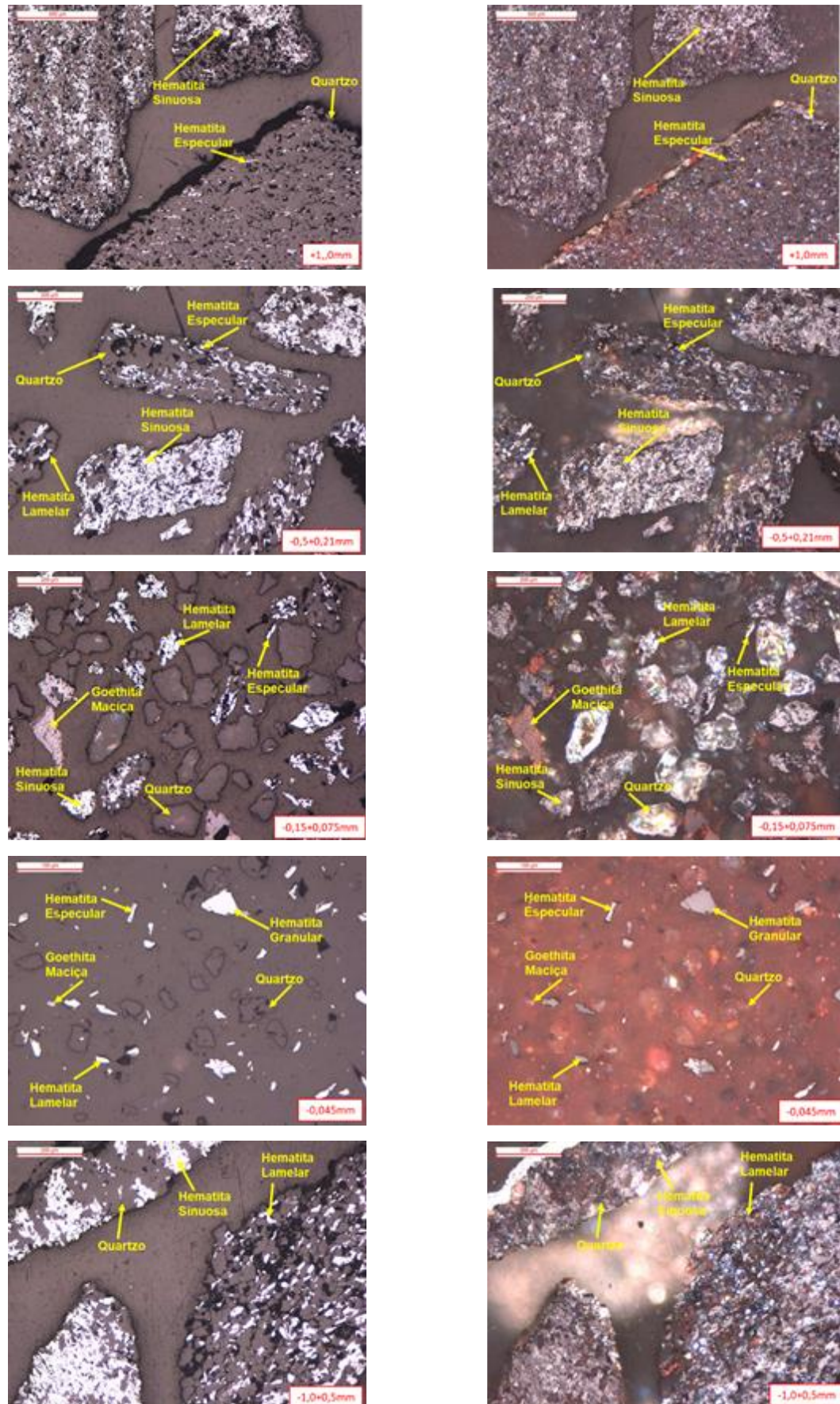


Figura B.14. Fotomicrografias do itabirito compacto



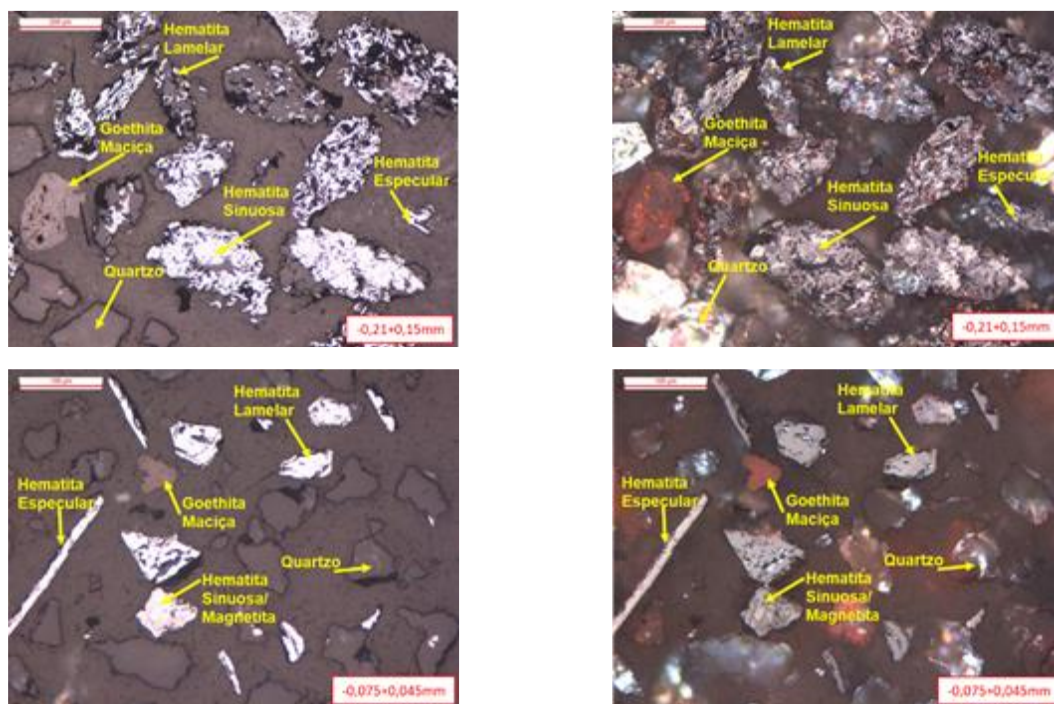


Tabela B.13. Modelo de liberação do itabirito friável

Amostra	ID Recebimento	Fração ( $\mu\text{m}$ )	% Retido Simples	Malha de Liberação (mm)	% Quartzo Misto	Malha de Moagem (mm) estimada
01	IF	+1000	14,89	0,105	2,24	0,105
		-1000+500	4,50	0,105	6,76	0,105
		-500+210	5,43	0,105	3,83	0,105
		-210+150	4,70	0,105	0,77	0,105
		-150+0,075	16,88	0,037	0,37	0,105
		-0,075+0,045	21,28	0,037	0,20	0,075
		-0,045	32,31	0,020	0,08	0,045
	Global Calculada	100,00	0,052	1,01	0,079	

Tabela B.14. Modelo de liberação do itabirito compacto

Amostra	ID Recebimento	Fração ( $\mu\text{m}$ )	% Retido Simples	Malha de Liberação (mm)	% Quartzo Misto	Malha de Moagem (mm) estimada
02	IC	+1000	47,79	0,045	36,41	0,045
		-1000+500	11,65	0,045	35,49	0,045
		-500+210	5,62	0,045	34,84	0,045
		-210+150	1,99	0,045	26,50	0,045
		-150+0,075	5,43	0,045	5,18	0,045
		-0,075+0,045	7,90	0,030	1,61	0,045
		-0,045	19,63	0,015	0,48	0,045
	Global Calculada	100,00	0,032	11,53	0,045	

Tabela B.15. Principais tipos de associação entre quartzo e minerais ferrosos


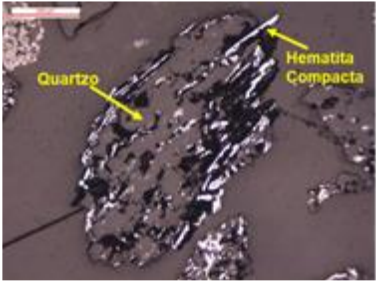
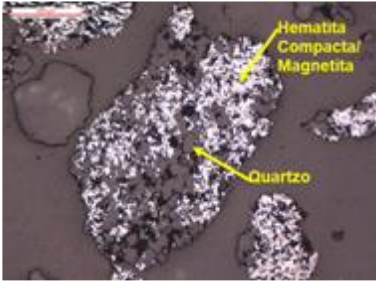

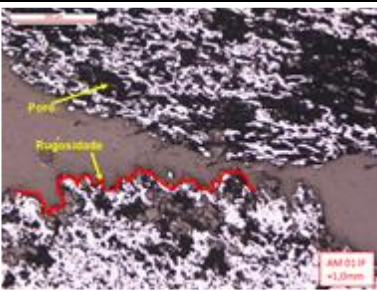
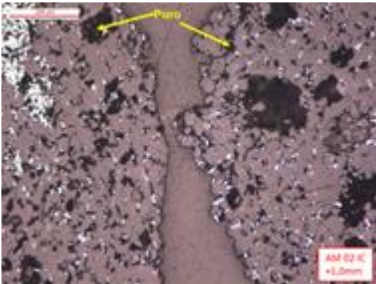
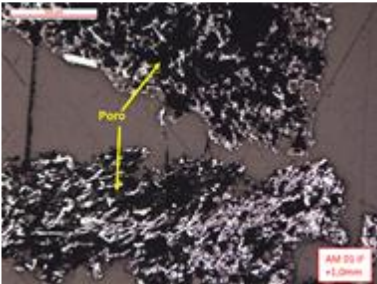
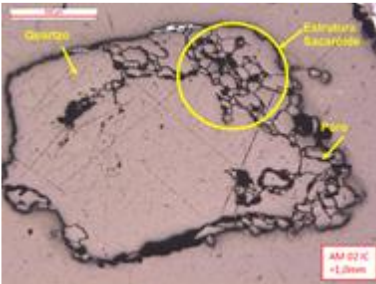
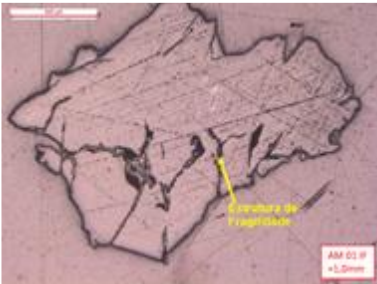
Amostra	Fotomicrografia	Descrição	Percentual de ocorrência
AM 01		Associação entre hematita compacta e quartzo, onde os cristais de quartzo encontram-se mistos complexamente, porém com aparente fragilidade. Tal estrutura tende a uma liberação diferencial. Sugere-se como malha de cominuição o tamanho acima da média dos cristais de quartzo, 0,105mm	100
AM 02		Partícula composta por hematita compacta e quartzo. Os cristais de hematita possuem orientação preferencial e estão justapostos aos cristais de quartzo. A liberação tende ocorrer por destacamento. Sugere-se como malha de cominuição o tamanho médio dos cristais de quartzo, 0,075mm	30
AM 02		Partícula composta por hematita compacta, podendo conter relictos de magnetita, e quartzo. Os cristais de quartzo se encontram mistos complexamente à partícula. A liberação tende ocorrer por fragmentação diferencial. Sugere-se como malha de cominuição o tamanho médio dos cristais de quartzo, 0,045mm	70

Tabela B.16. Análise qualitativa das amostras de itabirito friável e compacto

Fotomicrografias	Observações	Fotomicrografias
	<p>Partículas apresentam rugosidade, tendendo promover geração de finos e, a porosidade presente, pode proporcionar a fragmentação da partícula.</p>	
	<p>Partículas apresentam rugosidade, tendendo promover geração de finos e, a porosidade presente, pode proporcionar a fragmentação da partícula.</p>	
	<p>Estrutura sacaróide demonstrada em uma partícula formada por, basicamente quartzo. Pode-se perceber também a porosidade intergranular.</p>	
	<p>Para o IF percebe-se uma estrutura com pontos frágeis</p>	

## ANEXO B - Resultado do ensaio de picnometria com Hélio



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
 Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br

**RESULTADOS DE DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA****RELATÓRIO:** PHE 001-21**DATA:** 21/01/2021**CLIENTE:** Mauricio Guimarães Bergerman**1. AMOSTRAS ESTUDADAS**

Foram encaminhadas duas amostras, identificadas na Tabela 1, para determinação da massa específica.

**2. MÉTODO**

A determinação da massa específica foi efetuada por picnometria com instrusão de gás hélio, em equipamento da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340, com 10 ciclos de purga.

A análise foi realizada em alíquota pulverizada e seca em estufa (105°C) por 12 horas.

**3. RESULTADO**

Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 1 e correspondem à média de dez determinações por amostra.

**Tabela 1 – Resultado da determinação da massa específica**

Nº LCT	Amostra	massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	
		média	desv. pad
199-21	Itabirito Compacto - 3,36 mm	3,6572	0,0018
200-21	Itabirito Friável - 3,36 mm	3,6123	0,0089

Executado por: Guilherme Pinho Nery (21/01/2021 10:14 BRT)  
 Revisado por: Dra. Maria Manuela Tassinari (26/01/2021 16:03 BRT)

Prof. Dra. Carina Ulzen  
 Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **MKRW-XCXM-ZBRE-SFVB**

## ANEXO C - Resultado do ensaio de WI

Tabela B.17. Sumário do itabirito friável – Lote 1 sem escalpe

Ensaio de Wi						
Amostra: Itabirito Friável						
Sumário						

Amostra	Malha Teste (mm)	% Passante na Malha Teste na Alimentação	F <sub>80</sub> (mm)	P <sub>80</sub> (mm)	Gpb (g/rev)	WI (kWh/t)
Itabirito Friável	0,150	71,4	0,303	0,092	3,933	10,8

Tabela B.18. Ciclos do itabirito friável – Lote 2

Ensaio de Wi		
Amostra: Itabirito Friável		
Acompanhamento de Moagem		

Identificação da Amostra:	VALE ITABIRITO FRIAVEL
Data:	07/10/2020
Operador:	HELIO HENRIQUE

Malha do Teste	0,150	mm
Massa Original (MO)	1485,2	g
Fração da Alimentação Passante na Malha do Teste	0,714	
Produto Ideal (Z)	424	g

Período	Número de Rotações	Alimentação Nova	Massa Passante na Malha Teste	Massa a ser Moída	Massa Retida no Produto Moído	Massa Passante no Produto Moído	Massa Passante na Malha Teste Gerada no Período	Gramas por Revolução	Média de Gramas por Revolução dos Últimos Três Períodos
	(revs)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g / revs)	
1	60	1485,2	1060,1	-635,8	296,8	1188,4	128,3	2,138	-
2	1	1188,4	848,3	-423,9	648,7	836,5	-11,8	-11,758	-
3	15	836,5	597,1	-172,7	833,7	651,5	54,4	3,704	-
4	1	651,5	465,0	-40,7	1018,1	467,1	2,1	2,071	-
5	44	467,1	333,4	90,9	971,1	514,1	180,7	4,116	-
6	14	514,1	367,0	57,4	1062,7	422,5	55,5	3,984	-
7	31	422,5	301,6	122,8	1063,5	421,7	120,1	3,898	-
8	32	421,7	301,0	123,3	1060,2	425,0	124,0	3,919	3,933



Tabela B.19. Distribuições do itabirito friável – Lote 1 sem escalpe

<b>Ensaio de Wi</b>
<b>Amostra: Itabirito Friável</b>
<b>Distribuições Granulométricas</b>

Malha (mm)	% Passante acumulada	
	Alimentação	Produto
3,35	100	100
2,36	97,96	100
1,70	92,54	100
1,16	89,03	100
0,850	86,43	100
0,600	84,54	100
0,420	82,45	100
0,300	79,93	100
0,212	76,81	100
0,150	71,38	100
0,106	64,11	85,67
0,075	53,20	72,05
0,053	26,37	56,10
0,045	21,02	46,02
P <sub>80</sub> (mm)	0,303	0,092

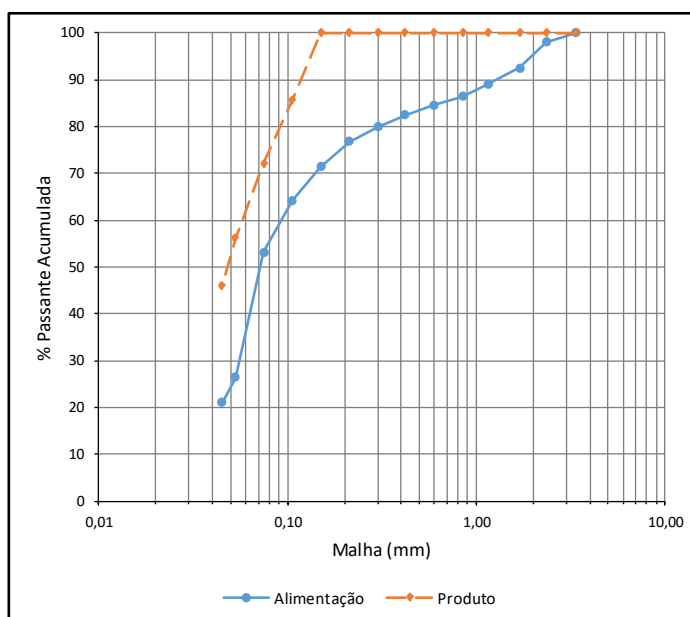


Tabela B.20. Sumário do itabirito friável – Lote 2

Amostra	Malha Teste (mm)	% Passante na Malha Teste na Alimentação	F <sub>80</sub> (mm)	P <sub>80</sub> (mm)	Gpb (g/rev)	WI (kWh/t)
ITABIRITO FRIÁVEL	0,150	70,5	0,51	0,087	5,156	6,4

Tabela B.21. Ciclos do itabirito friável – Lote 2

Ensaio de WI
Planilha de Acompanhamento de Moagem

Identificação da Amostra:	ITABIRITO FRIÁVEL
Data:	13/06/2022
Operador:	HELIO HENRIQUE

Malha do Teste	0,150	mm
Massa Original (MO)	1601,5	g
Fração da Alimentação Passante na Malha do Teste	0,705	
Produto Ideal (Z)	458	g

Período	Número de Rotações	Alimentação Nova	Massa Passante na Malha Teste	Massa a ser Moída	Massa Retida no Produto Moído	Massa Passante no Produto Moído	Massa Passante na Malha Teste Gerada no Período	Gramas por Revolução	Média de Gramas por Revolução dos Últimos Três Períodos
	(revs)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g / revs)	
1	10	1601,5	1129,5	-671,9	427,4	1174,1	44,6	4,458	-
2	1	1174,1	828,1	-370,5	791,1	810,4	-17,7	-17,680	-
3	6	810,4	571,6	-114,0	1003,0	598,5	26,9	4,177	-
4	8	598,5	422,1	35,5	1131,2	470,3	48,2	5,677	-
5	22	470,3	331,7	125,9	1145,3	456,2	124,5	5,615	5,156

Tabela B.22. Distribuições do itabirito friável – Lote 2

Malha (mm)	% Passante acumulada	
	Alimentação	Produto
3,35	100	100
2,36	96,1	100
1,70	90,8	100
1,16	86,6	100
0,850	83,6	100
0,600	81,0	100
0,420	78,7	100
0,300	76,6	100
0,212	74,2	100
0,150	70,5	100,0
0,106	64,4	88,5
0,075	52,4	74,2
0,053	37,0	58,7
0,045	28,0	49,9
P <sub>80</sub> (mm)	0,51	0,087

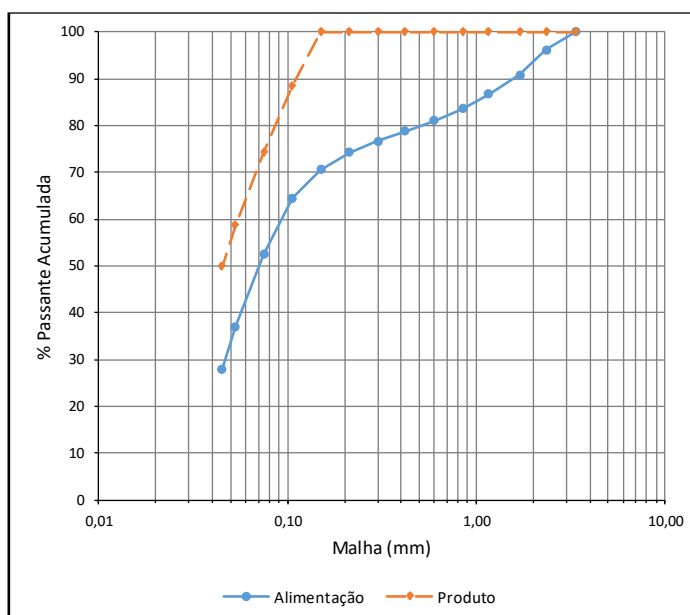


Tabela B.23. Sumário do itabirito compacto – Lote 1 sem escalpe

<b>Ensaio de Wi</b>
<b>Amostra: Itabirito Compacto</b>
<b>Sumário</b>

Amostra	Malha Teste (mm)	% Passante na Malha Teste na Alimentação	F <sub>80</sub> (mm)	P <sub>80</sub> (mm)	Gpb (g/rev)	WI (kWh/t)
Itabirito Compacto	0,150	33,8	1,999	0,078	3,044	6,8

Tabela B.24. Ciclos do itabirito compacto – Lote 1 sem escalpe

<b>Ensaio de Wi</b>
<b>Amostra: Itabirito Compacto</b>
<b>Acompanhamento de Moagem</b>

Identificação da Amostra:	VALE ITABIRITO COMPACTO
Data:	08/10/2020
Operador:	HELIO HENRIQUE

Malha do Teste	0,150	mm
Massa Original (MO)	1720,9	g
Fração da Alimentação Passante na Malha do Teste	0,338	
Produto Ideal (Z)	492	g

Período	Número de Rotações	Alimentação Nova	Massa Passante na Malha Teste	Massa a ser Moída	Massa Retida no Produto Moído	Massa Passante no Produto Moído	Massa Passante na Malha Teste Gerada no Período	Gramas por Revolução	Média de Gramas por Revolução dos Últimos Três Períodos
	(revs)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g / revs)	
1	60	1720,9	582,0	-90,3	957,5	763,4	181,4	3,023	-
2	77	763,4	258,2	233,5	1213,4	507,5	249,3	3,228	-
3	99	507,5	171,6	320,0	1240,5	480,4	308,8	3,114	-
4	106	480,4	162,5	329,2	1240,7	480,2	317,7	3,005	-
5	110	480,2	162,4	329,3	1228,3	492,6	330,2	3,013	3,044

Tabela B.25. Distribuições do itabirito compacto – Lote 1 sem escalpe

<b>Ensaio de Wi</b>
<b>Amostra: Itabirito Compacto</b>
<b>Distribuições Granulométricas</b>

Malha (mm)	% Passante acumulada	
	Alimentação	Produto
3,35	100	100
2,36	89,86	100
1,70	71,44	100
1,16	58,79	100
0,850	49,82	100
0,600	45,83	100
0,420	41,02	100
0,300	38,04	100
0,212	35,94	100
0,150	33,82	100
0,106	31,48	88,45
0,075	27,87	78,94
0,053	20,15	66,49
0,045	17,33	57,99
P <sub>80</sub> (mm)	1,999	0,078

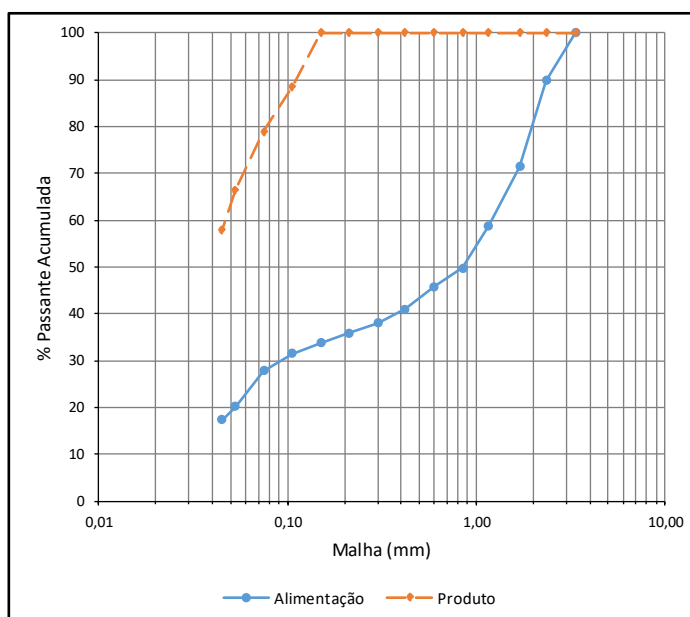


Tabela B.26. Sumário do itabirito compacto – Lote 2

Amostra	Malha Teste (mm)	% Passante na Malha Teste na Alimentação	F <sub>80</sub> (mm)	P <sub>80</sub> (mm)	Gpb (g/rev)	WI (kWh/t)
ITAB COMPACTO	0,150	31,0	1,91	0,082	2,961	7,3

Tabela B.27. Ciclos do itabirito compacto – Lote 2

Ensaio de Wi
Planilha de Acompanhamento de Moagem

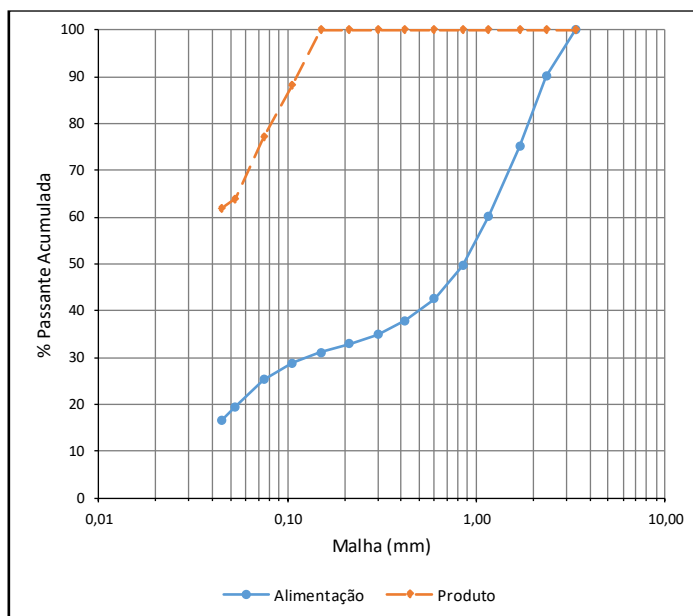
Identificação da Amostra:	ITABIRITO COMPACTO
Data:	15/06/2022
Operador:	HELIO HENRIQUE

Malha do Teste	0,150	mm
Massa Original (MO)	1646,7	g
Fração da Alimentação Passante na Malha do Teste	0,310	
Produto Ideal (Z)	470	g

Período	Número de Rotações	Alimentação Nova	Massa Passante na Malha Teste	Massa a ser Moída	Massa Retida no Produto Moído	Massa Passante no Produto Moído	Massa Passante na Malha Teste Gerada no Período	Gramas por Revolução	Média de Gramas por Revolução dos Últimos Três Períodos
	(revs)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g / revs)	
1	60	1646,7	510,6	-40,1	963,7	683,0	172,4	2,874	-
2	90	683,0	211,8	258,7	1162,8	483,9	272,1	3,023	-
3	106	483,9	150,0	320,4	1180,5	466,2	316,2	2,982	-
4	109	466,2	144,6	325,9	1180,3	466,4	321,8	2,945	-
5	111	466,4	144,6	325,9	1175,0	471,7	327,1	2,956	2,961

Tabela B.28. Distribuições do itabirito compacto – Lote 2

Malha (mm)	% Passante acumulada	
	Alimentação	Produto
3,35	100	100
2,36	90,1	100
1,70	75,1	100
1,16	60,2	100
0,850	49,6	100
0,600	42,5	100
0,420	37,9	100
0,300	34,9	100
0,212	32,9	100
0,150	31,0	100,0
0,106	28,9	88,3
0,075	25,2	77,1
0,053	19,4	63,9
0,045	16,7	61,9
P <sub>80</sub> (mm)	1,91	0,082



## ANEXO D - Resultado do ensaio de DWT

Ensaio DWT Simplificado
Amostra : Itabirito Compacto Vale

Parâmetros Obtidos a Partir do Ensaio			
Distribuições Granulométricas e Energias Específicas			
Malha (mm)	% Passante Acumulada		
19,0	100	100	93,00
13,2	98,71	96,75	62,67
9,50	98,18	87,77	44,20
4,75	82,96	65,60	20,56
2,36	59,27	43,05	11,06
1,70	47,73	34,57	8,46
0,85	33,50	24,98	5,88
0,42	26,78	20,54	4,78
0,21	22,55	17,24	4,06
Energia Específica (kWh/t)	2,51	1,01	0,248

Índice de Quebra	
A	69
b	0,73
IQ	50

Parâmetros Obtidos a Partir do Ajuste para DWT Completo	
Índice de Quebra	
A	75
b	1,173
IQ	88



## ANEXO E - Resultados dos ensaios Geopyöra – breakage test



# ITABIRITO

## Ore Breakage Characterisation



## Table of Contents

<b>INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
<b>THE GEOPYÖRÄ BREAKAGE TEST</b>	<b>3</b>
TEST CONCEPT	3
TEST PROCEDURE	4
<b>TEST RESULTS</b>	<b>5</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>5</b>
INTERPRETATION OF RESULTS	6
<b>STATISTICAL ANALYSIS</b>	<b>8</b>
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>10</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>10</b>
<b>DISCLAIMER</b>	<b>11</b>

## Introduction

Two Itabirito samples from Poli-USP were received in June 2021, for Geopyöra breakage tests and data analysis. The samples were identified as described in Table 1. The samples have been subjected to the standard Geopyöra breakage testing procedure and the data were analysed to determine the standard comminution and geotechnical parameters. Analysis and reporting were completed on December 14, 2021.

Table 1 – Summary test results

Code	Full Description
ITC	Itabirito Compacto
ITF	Itabirito Friavel

## The Geopyörä Breakage Test

The Geopyörä test provides ore specific parameters for use in mining and mineral processing studies. These parameters can be combined with equipment details and operating conditions to analyse and/or predict comminution performance. These ore specific parameters have been calculated from the test results and are supplied to OceanaGold in this report as part of the standard procedure.

### Test Concept

The Geopyörä breakage test concept is to use counter-rotating wheels to nip and crush a rock with a tightly controlled reduction ratio from the feed to a defined gap between rollers, as illustrated in Figure 1. This allows the automated feeding of rocks one at a time through the spinning wheels, with no requirement of stopping, resetting, and sweeping away broken fragments between each rock breakage. It also allows the measurement of the force applied and energy consumed in each breakage event. The force applied to break a rock with a given degree of compression is a function of the rock compressive strength. In contrast to drop weight test (DWT) methods, the input energy is a response to this crushing force, not a controlled test input. However, by varying the degree of reduction, i.e. the ratio of the crushing gap to the particle diameter, a range of input energies can be achieved for mapping the response of the rock to input force and the resultant input energy. In such a design it is necessary to measure the absorbed energy per rock breakage with sufficient precision, while ensuring non-slip grip and compression of the rocks to the point of fracture (Bueno et al. 2021).

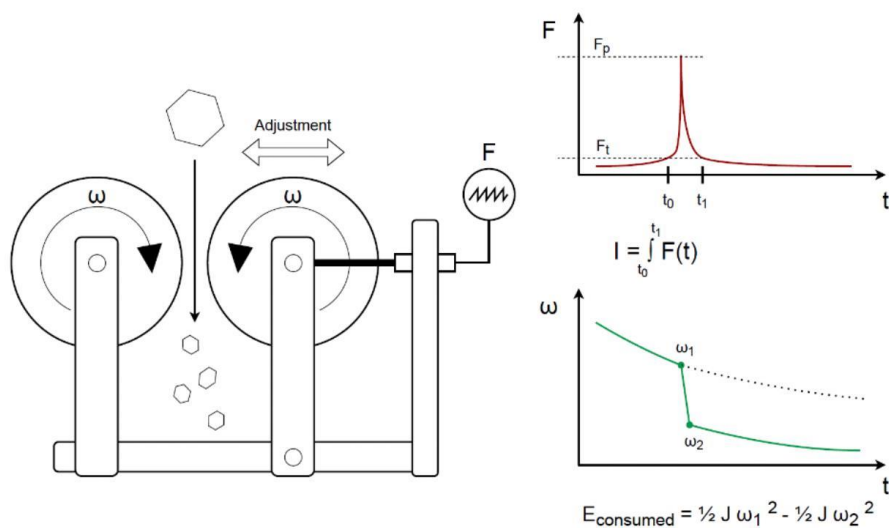


Figure 1 – Double wheel breakage test concept

## Test Procedure

The following standard test procedure was applied to both samples:

- Sample preparation
  - Break core with hammer and chisel (not needed for bulk ore samples)
  - Crush the sample using a jaw crusher with CSS at 20 mm
  - Sieve the sample using the following screen apertures
    - 22.4, 19, 16, 13.2, 12 and 9 mm
  - Choose the largest size fraction with more than 30 particles for testing
    - The -22.4+19 mm size fraction was selected for the light test (i.e. single energy)
    - Discard flaky particles
- Breakage test using the Geopyöra device
  - Run the calibration procedure
  - Set the gap and speed for the test
  - Weigh and feed one particle at a time
    - The scale is integrated to the Geopyöra
  - Collect the product for particle size analysis
- Product size analysis
  - Prepare a deck with the following sieves
    - Pan, Bond sieve, 2 sieves above,  $t_{10}^1$  size, 2 sieves above (6 sieves in total)
  - Sieve for 5 minutes using a RoTap
  - Record the following
    - Total mass
    - Mass above  $t_{10}$  sieve
    - Mass below Bond sieve
- Density (SG) measurements (optional for DWI estimation)
  - The SG measurements are done using 22.4 x 19 mm particles
  - The SG is calculated by the relative density method (weight in air / weight in air - weight in water)

---

<sup>1</sup>  $t_{10}$  refers to the 1/10<sup>th</sup> of the original particle size or percentage passing 1/10<sup>th</sup>

## Test Results

The complete test work data are provided in the attached Excel file.

### Summary

The averages of breakage force and specific energies measured during the test work at a high energy level (i.e. narrow gap – 1/3 of mean particle size) are summarised in Table 2.

Table 2 – Summary test results

Sample	Mean F (kN)	Mean Ecs (kWh/t)
ITC	15.0	0.56
ITF	6.5	0.17

The t<sub>10</sub> parameter and the percentage passing 150 µm measured during the product size analysis for are summarised in Table 3.

Table 3 – Summary particle size analysis

Sample	t <sub>10</sub> (%)	% -150 µm
ITC	16.8	5.6
ITF	28.7	16.5

The test work data has been analysed to estimate standard comminution and geotechnical parameters for the two samples, which are summarized in Table 4.

Table 4 – Summary test results

Sample	Axb	SG (t/m <sup>3</sup> )	DWI (kWh/m <sup>3</sup> )	BWI (kWh/t)	PLT Is (MPa)	UCS (MPa)
ITC	43.8	3.52	7.93	11.6	11.8	237
ITF	458 <sup>2</sup>	4.34	0.85	6.1	5.2	103

<sup>2</sup> This value is unrealistic high (i.e. extremely friable)

## Interpretation of results

- Axb Parameter / Resistance to Impact Breakage
  - One of the problems with the functional form used to represent the  $t_{10}$  vs  $Ecs$  relationship is that the parameters A and b of the breakage equation (Eq 1) are not independent and thus cannot be used directly for comparisons between ore types (Napier-Munn et al., 1996).
 
$$t_{-10} = A \times (1 - e^{(-b \cdot Ecs)}) \quad \text{Eq 1}$$
  - Two alternative parameters give a better comparison. One of these is the product Axb. For this parameter, a smaller number means a greater resistance to impact breakage.
  - The JKDWT uses 15 sets of particles between the size of -63+53 mm to -16+13.2 mm while the SMC Test uses less material, with two samples sets of 20 particles in the size range of -31.5+26.5 mm to -16+13.2 mm. For the Geopyöra test, only one particle size fraction is used, and the -19+16 mm was selected for this test.
  - Both JKDWT and SMC Test use pre-determined energy levels, while the Geopyöra test has variable energy levels which can be adjusted by changing the gap aperture. The energy range for the JKDWT test is between 0,1 kWh/t to 2,5 kWh/t while the SMC Test uses two energy levels of 1.76 kWh/t and 0.49 kWh/t. The Geopyöra test was set up with two gap sizes at 1/3 and 2/3 of the particle geometric mean, which represent low and high energy levels respectively.
  - The validation results (Matus Chavez, T and Bueno, M et al. 2020) proved that the estimation of Axb parameter using Geopyöra test data the JKDWT Axb and SMC Test® DWI parameters correlate appropriately with the results of the Geopyöra test, within a relative error of  $\pm 20\%$  across all samples.
  
- Effect of Particle Size on Resistance to Impact Breakage
  - Variation of impact resistance with particle size is important for crusher power draw calculations and SAG/autogenous mill media competency considerations. Some ores exhibit a significant decrease in impact resistance with increasing particle size while others show no variation with size. The opposite trend of increasing impact resistance with increasing particle size is extremely rare.
  - The Geopyöra test uses a single size fraction and makes use of a standard relationship to predict the A and b of the particle size that has the same value as the mean for a JK full Drop-Weight test.
  
- Density Results
  - Density values were provided by OceanaGold

## Statistical Analysis

The measured breakage energy and force data have been statistically analysed to compare the ore samples. The data variability can be visualised in the box plot charts presented in Figure 2 and Figure 3. The t-test results presented in Figure 4 and Figure 5 show that there are no significant differences between the samples both for the measured specific energy and force during the breakage test.

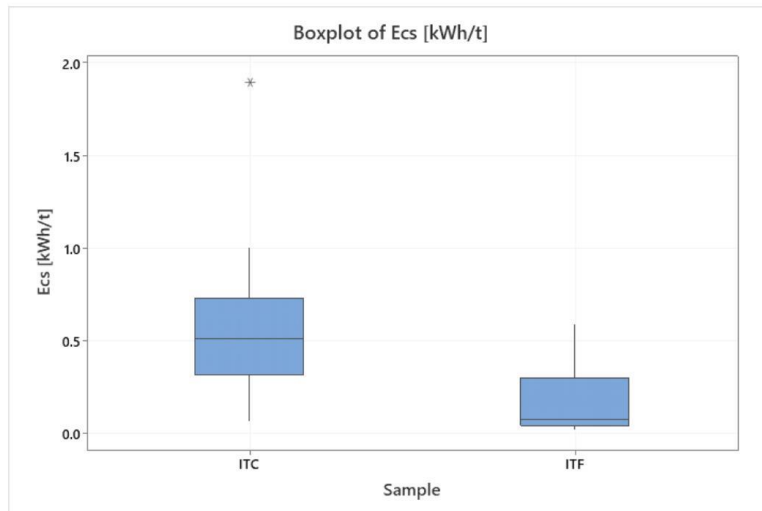


Figure 2 – Boxplot of measured specific comminution energy data

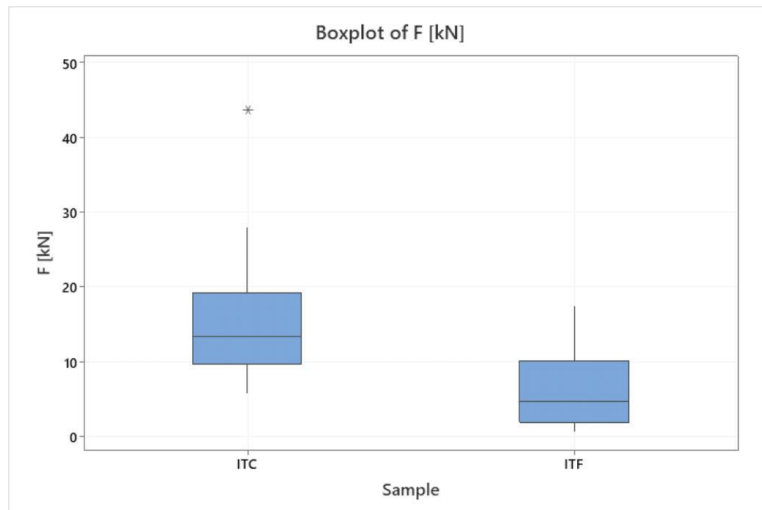


Figure 3 – Boxplot of measured force data



OceanaGold - Ore Breakage Characterization

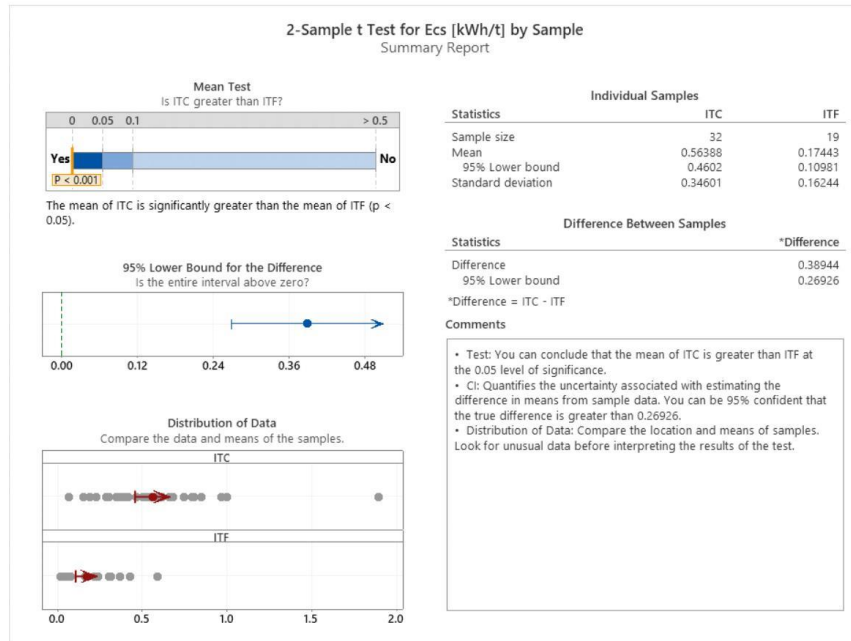


Figure 4 – t-test for Ecs



Figure 5 – t-test for force

## Conclusions

The following conclusions can be drawn from this test work:

- ITC is significantly more competent and harder than ITF
- More test work is recommended to confirm the breakage properties of each ore type as well as to potentially identify other ore types, assess their variability and map these properties within the ore body.
- Comparison against the existing test work data (Bond ball mill test) has shown no correlation with the Geopyöra testwork data.

## References

Bueno, M, Torvela, J, Chandramohan, R, Chavez Matus, T, Liedes, T and Powell, MS 2021, 'Double Wheel Breakage Test', Minerals Engineering, vol. 168, no. 106905, pp. 1-12.

Bueno, M., Chavez Matus, T., Powell, MS, Michaux, S., Luukkanen, S., 2020 - The Geopyöra breakage test for geometallurgy in IMPC 2020: XXX International Mineral Processing Congress, Cape Town, SA, 18-22 October 2020

Doll, A. (2016). Calculating DWI from a drop weight test result. [www.sagmilling.com](http://www.sagmilling.com)

Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., 1996. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation, first ed. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia.

## Disclaimer

### Warranty by Geopyörä

- a. Geopyörä will use its best endeavours to ensure that all documentation, data, recommendations, information, advice, and reports ("Material"), provided by Geopyörä to the client ("Recipient"), is accurate at the time of providing it.

### Extent of Warranty by Geopyörä

- b. Geopyörä does not make any representations as to any matter, fact or thing that is not expressly provided for in the Material.
- c. Geopyörä does not give any warranty, nor accept any liability in connection with the Material, except to the extent, if any, required by law or specifically provided in writing by Geopyörä to the Recipient.
- d. Geopyörä will not be liable to the Recipient for any claims relating to Material in any language other than in English.
- e. If, apart from this Disclaimer, any warranty would be implied whether by law, custom or otherwise, that warranty is to the full extent permitted by law excluded.
- f. The Recipient will promptly advise Geopyörä in writing of any losses, damages, compensation, liabilities, amounts, monetary and non-monetary costs, and expenses ("Losses"), incurred or likely to be incurred by the Recipient or Geopyörä in connection with the Material, and any claims, actions, suits, demands or proceedings ("Liabilities") which the Recipient or Geopyörä may become liable in connection with the Material.

### Indemnity and Release by the Recipient

- g. The Recipient indemnifies, releases, discharges, and saves harmless, Geopyörä against any and all Losses and Liabilities, suffered or incurred by Geopyörä, whether under the law of contract, tort, statutory duty or otherwise as a result of:
- i) the Recipient relying on the Material;
  - ii) any liability for infringement of a third party's trade secrets, proprietary or confidential information, patents, registered designs, trademarks or names, copyright, or other protected rights; and
  - iii) any act or omission of Geopyörä, any employee, agent or permitted sub-contractor of Geopyörä in connection with the Material.

### Limit of Liability

- h. Geopyörä's liability to the Recipient in connection with the Material, whether under the law of contract, tort, statutory duty or otherwise, will be limited to the lesser of:
- i) the total cost of the job; or
  - ii) Geopyörä providing amended Material rectifying the defect.

### Exclusion of Consequential Loss

- i. Geopyörä is not liable to the Recipient for any consequential, special or indirect loss (loss of revenue, loss of profits, business interruption, loss of opportunity and legal costs and disbursements), in connection with the Material whether under the law of contract, tort, statutory duty or otherwise.

### Defects

- j. The Recipient must notify Geopyörä within seven days of becoming aware of a defect in the Material. To the extent that the defect is caused by Geopyörä's negligence or breach of contract, Geopyörä may, at its discretion, rectify the defect.

### Duration of Liability

- k. After the expiration of one year from the date of first providing the Material to the client, Geopyörä will be discharged from all liability in connection with the Material. The Recipient (and persons claiming through or under the Recipient) will not be entitled to commence any action, claim or proceeding of any kind whatsoever after that date, against Geopyörä (or any employee of Geopyörä) in connection with the Material.

### Contribution

- l. Geopyörä's liability to the Recipient for any loss or damage, whether under the law of contract, tort, statutory duty or otherwise will be reduced to the extent that an act or omission of the Recipient, its employees or agents, or a third party to whom the Recipient has disclosed the Material, contributed to the loss or damage.

### Severability

- m. If any provision of this Disclaimer is illegal, void, invalid or unenforceable for any reason, all other provisions which are self-sustaining and capable of separate enforcement will, to the maximum extent permitted by law, be and continue to be valid and enforceable

## ANEXO F - Resultados dos ensaios pelo método de espalhamento a laser de baixo ângulo



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Caracterização Tecnológica**  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
 Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



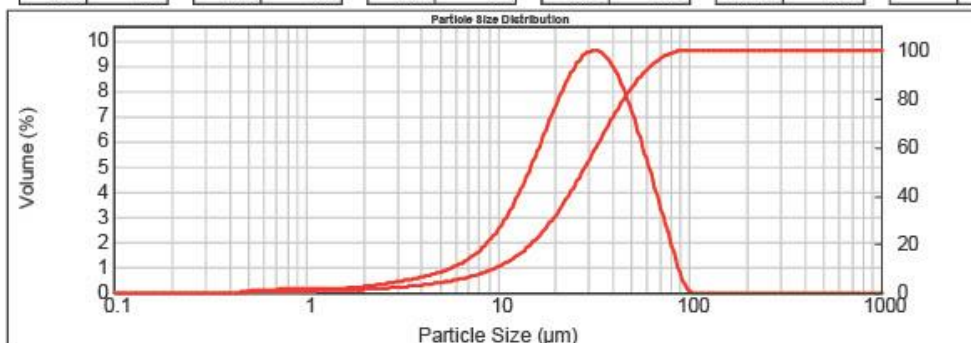
### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

<b>Relatório:</b> MAL 424-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:12:17
<b>Ciente:</b> Mauricio Guimarães Bergeman	<b>Analista:</b> Alicia	<b>Data da análise:</b>
<b>Amostra:</b> 1 - 100% B - 3 m 30 s	<b>Fonte de resultados:</b> Editad	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:12:18
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 µm	<b>Obscurecência:</b> 10.24 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.525 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0220 %Vol	<b>Span :</b> 1.699	<b>Uniformidade:</b> 0.521	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
<b>Área superf. espec.:</b> 0.38 m <sup>2</sup> /g	<b>D[3,2]:</b> 15.804 µm	<b>D[4,3]:</b> 30.947 µm	
<b>d(0.1):</b> 9.703 µm	<b>d(0.5):</b> 27.839 µm	<b>d(0.9):</b> 56.994 µm	

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.50	7.096	6.40	50.238	84.61	365.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.60	7.962	7.50	56.368	89.57	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.70	8.934	8.84	63.246	93.59	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.81	10.024	10.51	70.963	96.62	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.93	11.247	12.57	79.621	98.70	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.07	12.619	15.11	89.337	99.78	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.23	14.159	18.23	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.42	15.887	21.99	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	1.64	17.825	26.46	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	1.91	20.000	31.64	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	2.22	22.440	37.51	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	2.59	25.179	43.98	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.06	3.991	3.01	28.251	50.90	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.13	4.477	3.50	31.698	58.09	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.22	5.034	4.06	35.566	65.30	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.31	5.637	4.72	39.905	72.28	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.40	6.325	5.48	44.774	78.79	316.979	100.00		



Executado por: Alicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
 Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

Profa. Dra. Carina Ulzen  
 Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **QQSI-IJLY-BMUM-YPZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



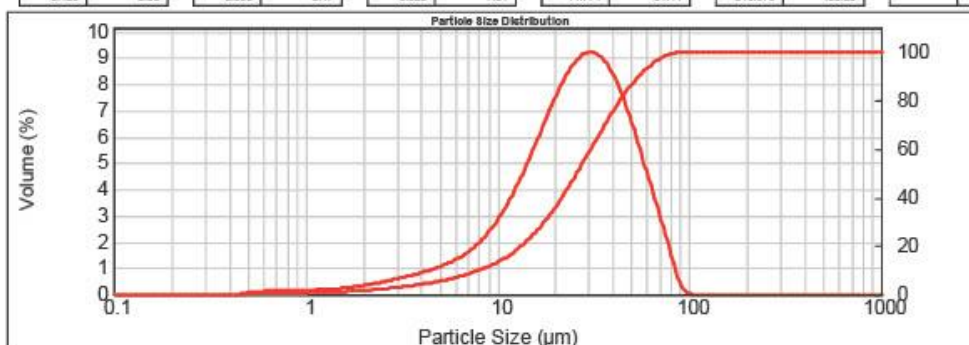
### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

<b>Relatório:</b> MAL 425-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:21:33
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:21:34
<b>Amostra:</b> 1 - 90/10 - 3 m 40 s	<b>Fonte de resultados:</b> Editad	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 µm	<b>Obscurecência:</b> 10.68 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.598 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0201 %Vol	<b>Span :</b> 1.788	<b>Uniformidade:</b> 0.545	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
<b>Área superf. espec.:</b> 0.43 m <sup>2</sup> /g	<b>D[3,2]:</b> 13.966 µm	<b>D[4,3]:</b> 29.028 µm	
<b>d(0.1):</b> 8.101 µm	<b>d(0.5):</b> 25.973 µm	<b>d(0.9):</b> 54.491 µm	

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.58	7.096	8.44	50.238	86.75	365.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.70	7.962	9.78	56.368	91.22	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.84	8.934	11.38	63.246	94.79	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.98	10.024	13.30	70.963	97.43	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.15	11.247	15.64	79.621	99.18	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.34	12.619	18.46	89.337	99.92	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.58	14.159	21.85	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.85	15.887	25.86	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	2.18	17.825	30.52	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	2.56	20.000	35.85	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	3.00	22.440	41.77	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	3.51	25.179	48.20	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.07	3.991	4.09	28.251	54.98	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.15	4.477	4.75	31.698	61.92	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.25	5.024	5.49	35.566	68.79	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.35	5.637	6.34	39.905	75.36	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.47	6.325	7.31	44.774	81.41	316.979	100.00		



Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

Profa. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **JQSJ-PJLY-AEUM-CTZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

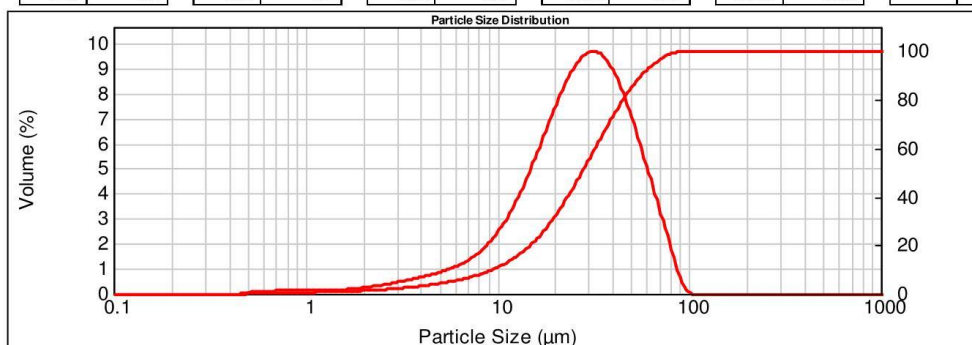
<b>Relatório:</b> MAL 426-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:43:09
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:43:10
<b>Amostra:</b> 1 - 75/25 - m	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscurecência:</b> 8.98 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.685 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0188 %Vol	<b>Span :</b> 1.699	<b>Uniformidade:</b> 0.519	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
-------------------------------------	------------------------	-------------------------------	--

<b>Área superf. espec.:</b> 0.386 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>D[3,2]:</b> 15.538 $\mu\text{m}$	<b>D[4,3]:</b> 30.594 $\mu\text{m}$
<b>d(0.1):</b> 9.479 $\mu\text{m}$	<b>d(0.5):</b> 27.569 $\mu\text{m}$	<b>d(0.9):</b> 56.314 $\mu\text{m}$

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.51	7.096	6.75	50.238	85.20	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.61	7.962	7.86	56.368	90.04	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.71	8.934	9.20	63.246	93.93	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.82	10.024	10.84	70.963	96.86	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.93	11.247	12.88	79.621	98.85	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.07	12.619	15.41	89.337	99.82	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.24	14.159	18.52	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.44	15.887	22.29	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	1.68	17.825	26.78	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	1.97	20.000	32.02	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	2.32	22.440	37.95	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	2.72	25.179	44.51	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.07	3.991	3.19	28.251	51.52	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.14	4.477	3.72	31.698	58.77	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.23	5.024	4.33	35.566	66.02	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.32	5.637	5.03	39.905	73.00	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.42	6.325	5.82	44.774	79.46	316.979	100.00		



Prof. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **SQSK-RJLY-FYUM-OWZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

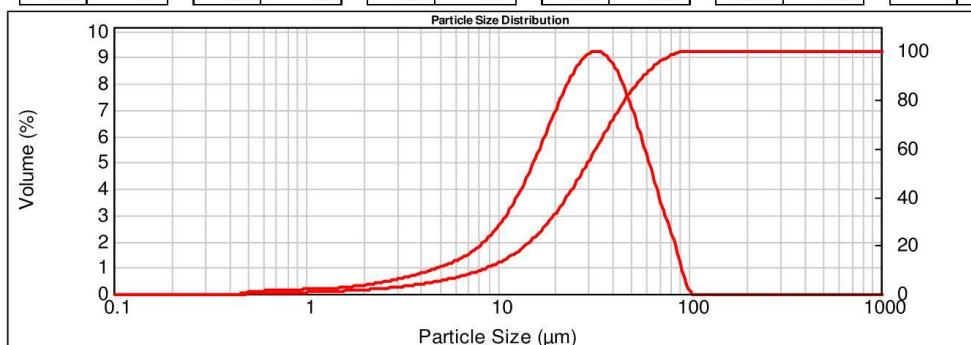
<b>Relatório:</b> MAL 427-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:51:18
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 10:51:19
<b>Amostra:</b> 1 - 50/50 - 7 m	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 µm	<b>Obscurecência:</b> 13.42 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.703 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0264 %Vol	<b>Span :</b> 1.802	<b>Uniformidade:</b> 0.55	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
-------------------------------------	------------------------	------------------------------	--

<b>Área superf. espec.:</b> 0.417 m <sup>2</sup> /g	<b>D[3,2]:</b> 14.372 µm	<b>D[4,3]:</b> 30.939 µm
<b>d(0.1):</b> 8.358 µm	<b>d(0.5):</b> 27.688 µm	<b>d(0.9):</b> 58.264 µm

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.61	7.096	8.17	50.238	83.82	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.74	7.962	9.41	56.368	88.74	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.88	8.934	10.88	63.246	92.78	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.04	10.024	12.62	70.963	95.89	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.21	11.247	14.71	79.621	98.13	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.41	12.619	17.22	89.337	99.59	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.63	14.159	20.24	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.90	15.887	23.83	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	2.21	17.825	28.06	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	2.57	20.000	32.95	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	2.98	22.440	38.48	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	3.47	25.179	44.60	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.07	3.991	4.02	28.251	51.18	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.15	4.477	4.65	31.698	58.04	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.25	5.024	5.36	35.566	64.98	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.36	5.637	6.18	39.905	71.74	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.48	6.325	7.11	44.774	78.09	316.979	100.00		



Prof. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **QQSL-EKLY-GGUM-QBZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



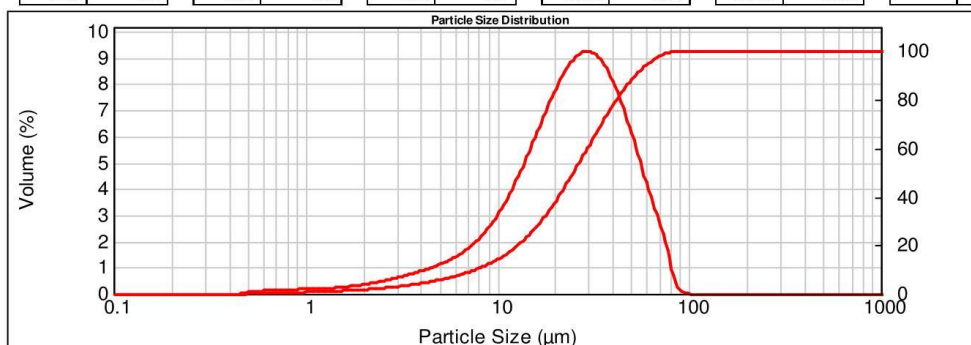
### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

<b>Relatório:</b> MAL 428-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:02:04
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:02:05
<b>Amostra:</b> 1 - 100% P - 20 m	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 µm	<b>Obscurecência:</b> 10.96 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.700 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0198 %Vol	<b>Span :</b> 1.790	<b>Uniformidade:</b> 0.547	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
<b>Área superf. espec.:</b> 0.448 m <sup>2</sup> /g	<b>D[3,2]:</b> 13.403 µm	<b>D[4,3]:</b> 27.900 µm	
<b>d(0.1):</b> 7.721 µm	<b>d(0.5):</b> 24.974 µm	<b>d(0.9):</b> 52.437 µm	

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.63	7.096	8.98	50.238	88.35	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.76	7.962	10.40	56.368	92.50	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.91	8.934	12.11	63.246	95.73	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.07	10.024	14.16	70.963	98.08	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.25	11.247	16.64	79.621	99.63	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.46	12.619	19.62	89.337	99.97	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.70	14.159	23.19	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.99	15.887	27.39	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	2.33	17.825	32.26	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	2.73	20.000	37.79	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	3.19	22.440	43.90	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	3.72	25.179	50.48	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.08	3.991	4.34	28.251	57.35	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.16	4.477	5.03	31.698	64.31	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.26	5.024	5.82	35.566	71.11	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.38	5.637	6.73	39.905	77.53	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.50	6.325	7.77	44.774	83.32	316.979	100.00		



Prof. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **MQSM-FKLY-HNUM-GGZB**





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

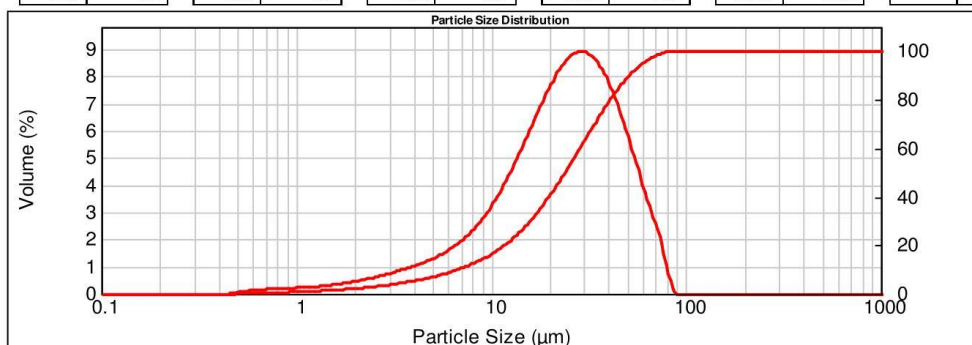
<b>Relatório:</b> MAL 429-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:08:49
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:08:50
<b>Amostra:</b> 2 - 100% B - 10 m	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscurecência:</b> 10.22 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.729 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0167 %Vol	<b>Span :</b> 1.858	<b>Uniformidade:</b> 0.566	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
-------------------------------------	------------------------	-------------------------------	--

<b>Área superf. espec.:</b> 0.491 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>D[3,2]:</b> 12.229 $\mu\text{m}$	<b>D[4,3]:</b> 26.877 $\mu\text{m}$
<b>d(0.1):</b> 6.739 $\mu\text{m}$	<b>d(0.5):</b> 23.975 $\mu\text{m}$	<b>d(0.9):</b> 51.283 $\mu\text{m}$

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.73	7.096	10.64	50.238	89.23	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.90	7.962	12.23	56.368	93.18	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.09	8.934	14.11	63.246	96.23	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.30	10.024	16.34	70.963	98.41	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.54	11.247	18.98	79.621	99.82	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.81	12.619	22.10	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.13	14.159	25.77	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.50	15.887	30.03	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	2.92	17.825	34.91	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	3.41	20.000	40.37	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	3.97	22.440	46.36	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	4.60	25.179	52.76	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.09	3.991	5.32	28.251	59.42	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.18	4.477	6.13	31.698	66.14	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.30	5.024	7.05	35.566	72.68	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.43	5.637	8.08	39.905	78.85	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.57	6.325	9.27	44.774	84.41	316.979	100.00		



Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

Profa. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **TQSN-KKLY-GXUM-IIZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

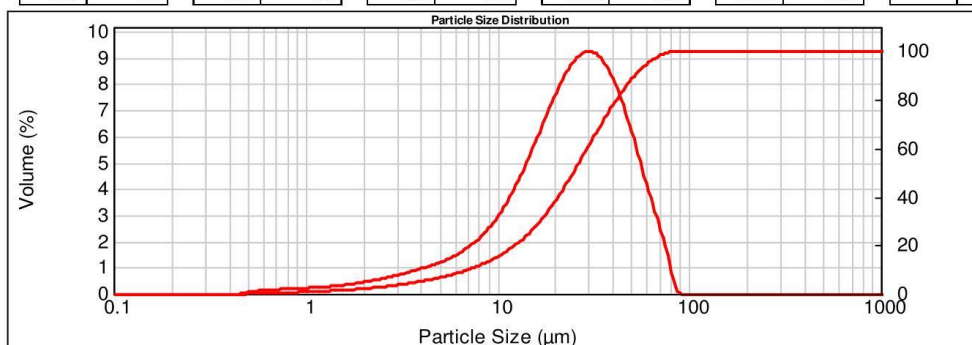
<b>Relatório:</b> MAL 430-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:17:10
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:17:11
<b>Amostra:</b> 2 - 90/10 - 11m 30 s	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscurecência:</b> 10.76 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.768 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0181 %Vol	<b>Span :</b> 1.802	<b>Uniformidade:</b> 0.549	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
-------------------------------------	------------------------	-------------------------------	--

<b>Área superf. espec.:</b> 0.477 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>D[3,2]:</b> 12.571 $\mu\text{m}$	<b>D[4,3]:</b> 27.606 $\mu\text{m}$
<b>d(0.1):</b> 7.054 $\mu\text{m}$	<b>d(0.5):</b> 24.925 $\mu\text{m}$	<b>d(0.9):</b> 51.969 $\mu\text{m}$

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.73	7.096	10.07	50.238	88.68	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.90	7.962	11.51	56.368	92.85	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.09	8.934	13.20	63.246	96.07	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.30	10.024	15.22	70.963	98.35	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.54	11.247	17.63	79.621	99.77	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.81	12.619	20.51	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.12	14.159	23.95	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.47	15.887	28.01	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	2.88	17.825	32.73	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	3.35	20.000	38.11	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	3.89	22.440	44.09	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	4.49	25.179	50.59	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.09	3.991	5.17	28.251	57.42	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.18	4.477	5.93	31.698	64.37	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.30	5.024	6.79	35.566	71.22	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.43	5.637	7.74	39.905	77.70	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.57	6.325	8.83	44.774	83.58	316.979	100.00		



Prof. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **DQSO-PLLY-VEUM-IXZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

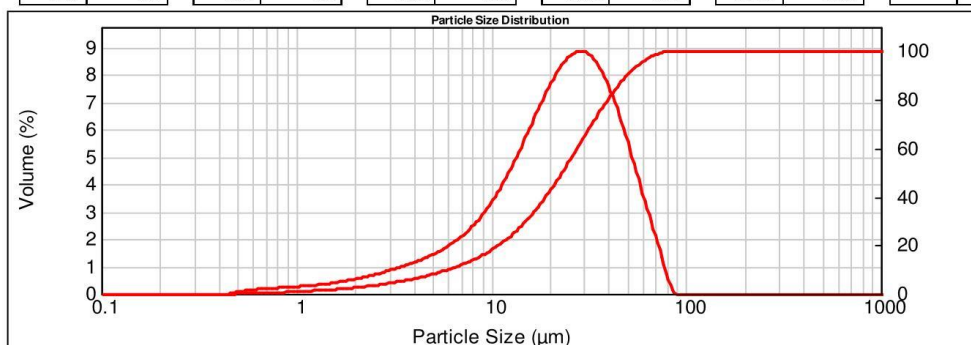
<b>Relatório:</b> MAL 431-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:27:44
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:27:45
<b>Amostra:</b> 2 - 50/50 - 20 m	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscurecência:</b> 11.38 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.636 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0172 %Vol	<b>Span :</b> 1.881	<b>Uniformidade:</b> 0.572	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
-------------------------------------	------------------------	-------------------------------	--

<b>Área superf. espec.:</b> 0.529 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>D[3,2]:</b> 11.347 $\mu\text{m}$	<b>D[4,3]:</b> 25.886 $\mu\text{m}$
<b>d(0.1):</b> 6.030 $\mu\text{m}$	<b>d(0.5):</b> 23.162 $\mu\text{m}$	<b>d(0.9):</b> 49.599 $\mu\text{m}$

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.85	7.096	12.04	50.238	90.47	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.05	7.962	13.74	56.368	94.18	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.28	8.934	15.72	63.246	96.98	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.54	10.024	18.03	70.963	98.87	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.83	11.247	20.75	79.621	99.88	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	2.16	12.619	23.93	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.53	14.159	27.65	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.96	15.887	31.95	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	3.46	17.825	36.83	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	4.02	20.000	42.30	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	4.66	22.440	48.28	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.02	3.557	5.38	25.179	54.66	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.10	3.991	6.19	28.251	61.28	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.20	4.477	7.10	31.698	67.94	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.34	5.024	8.12	35.566	74.41	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.49	5.637	9.26	39.905	80.45	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.66	6.325	10.56	44.774	85.86	316.979	100.00		



Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

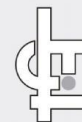
Profa. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **UQSP-QLLY-YMUM-WFZB**



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

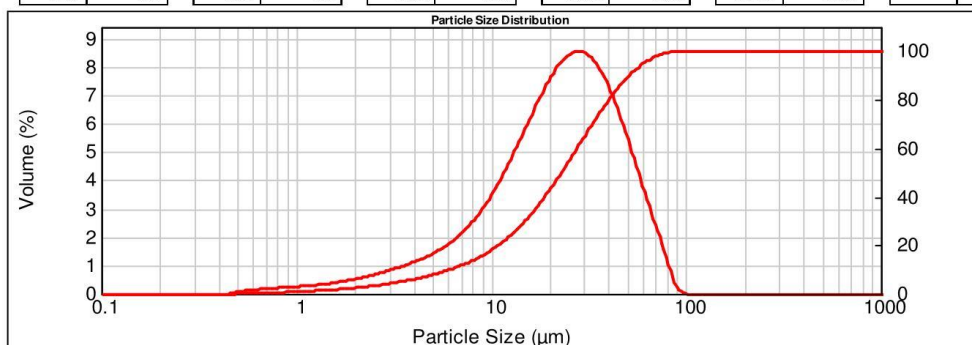
<b>Relatório:</b> MAL 432-2021	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:31:43
<b>Cliente:</b> Mauricio Guimarães Bergerman	<b>Analista:</b> Allicia	<b>Data da análise:</b> segunda-feira, 13 de setembro de 2021 11:31:44
<b>Amostra:</b> 2 - 100% P - 35 m	<b>Fonte de resultados:</b> Edited	
<b>Notas:</b> Meio de dispersão: água deionizada Vel. Bomba: 2500 rpm		

<b>Código I.R.:</b> 1.729_0.1	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.729	<b>Absorção:</b> 0.1	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscurecência:</b> 10.83 %
<b>Dispersante:</b> Water	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.330	<b>Resíduo:</b> 0.677 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentração:</b> 0.0165 %Vol	<b>Span :</b> 1.952	<b>Uniformidade:</b> 0.594	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
-------------------------------------	------------------------	-------------------------------	--

<b>Área superf. espec.:</b> 0.522 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>D[3,2]:</b> 11.486 $\mu\text{m}$	<b>D[4,3]:</b> 26.245 $\mu\text{m}$
<b>d(0.1):</b> 6.151 $\mu\text{m}$	<b>d(0.5):</b> 22.996 $\mu\text{m}$	<b>d(0.9):</b> 51.035 $\mu\text{m}$

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.80	7.096	11.83	50.238	89.45	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.00	7.962	13.58	56.368	93.15	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.22	8.934	15.63	63.246	96.04	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.47	10.024	18.03	70.963	98.12	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.75	11.247	20.86	79.621	99.46	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	2.07	12.619	24.16	89.337	99.97	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.44	14.159	27.99	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.86	15.887	32.38	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	3.34	17.825	37.32	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	3.89	20.000	42.79	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	4.51	22.440	48.70	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.02	3.557	5.21	25.179	54.94	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.09	3.991	6.00	28.251	61.35	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.19	4.477	6.89	31.698	67.75	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.32	5.024	7.89	35.566	73.94	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.46	5.637	9.03	39.905	79.73	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.62	6.325	10.33	44.774	84.94	316.979	100.00		



Prof. Dra. Carina Ulzen  
Coordenadora do LCT - Poli/USP

Executado por: Allicia Duarte de Oliveira (13/09/2021 16:30 BRT)  
Revisado por: M.Sc. (14/09/2021 08:36 BRT)

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente. Verifique a autenticidade deste documento em [www.lct.poli.usp.br](http://www.lct.poli.usp.br) utilizando o código **XQSQ-ELLY-BTUM-CYZB**