



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



FERNANDA HOFFMANN

JIGAGEM COMO ETAPA DE PRÉ-CONCENTRAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

OURO PRETO

2022

FERNANDA HOFFMANN

JIGAGEM COMO ETAPA DE PRÉ-CONCENTRAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO
2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernanda Hoffmann

Jigagem como etapa de pré-concentração do minério de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas

Aprovada em 28 de novembro de 2022

Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves- Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Mestre] - Marco Aurélio Soares Martins - (CEMI)

[Mestre] - Paula Bernardes Barreto - (Vale S/A)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2022, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0435773** e o código CRC **A028B9B5**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pelas inúmeras bênçãos ao longo dessa caminhada.

A minha família, Jonas, Célia e Ricardo, por terem sido meu porto seguro e por me apoiarem todos os dias.

Às amigas da República Serena, por terem sido meu lar e meu lugar de paz em Ouro Preto, em especial, à Cinderela e à Botox pelos risos e alegrias em dias difíceis.

Aos professores da UFOP pelo ensino de qualidade, em especial ao Carlos Alberto, Francielle e Vladmir.

Às empresas Fundação Gorceix (DETEMM), Anglo Gold Ashanti e ArcelorMittal France, por terem sido fundamentais no meu crescimento profissional e pessoal. Em especial ao Mining Department da ArcelorMittal pela oportunidade de desenvolvimento desse estudo.

Aos amigos e amigas de Ouro Preto, por toda parceria, troca e diversão ao longo dessa jornada.

A UFOP pelo ensino público e de qualidade.

Por fim, a cada pessoa que, de alguma forma, contribuiu para minha evolução e crescimento durante a graduação.

"A sabedoria não vem do acerto, mas sim do aprendizado com os erros."

- Monja Coen

RESUMO

A pré-concentração é um estágio amplamente utilizado na mineração e visa o enriquecimento do minério a partir da remoção de uma parte da ganga. Neste projeto, estudou-se a adição de uma etapa de pré-concentração utilizando-se o equipamento jigge numa das operações da empresa ArcelorMittal. As amostras estudadas correspondem à carga circulante do moinho que são: o oversize das peneiras primárias e secundárias e, também, o produto médio das espirais concentradoras cleaners. Os resultados dos testes de jigge mostraram-se promissores com as amostras das peneiras, removendo-se, em média 15% de massa desse circuito, com uma perda de ferro de 5%, quanto aos testes de WI com essas amostras, observa-se um valor sem muita variação comparando-se a amostra “tal qual” com os concentrados do teste de jigge, variando de 7 a 8 kWh/t. Quanto ao produto médio das espirais, observou-se a necessidade de uma rota diferente de pré-concentração ou a recirculação deste em outra etapa do processo, como, por exemplo, na concentração por espirais, já que é uma amostra muito diferente das outras duas, mais fina, com teor de alimentação mais alto e WI de 14,9 kWh/t. Ainda assim, pode-se observar resultados consideráveis nos testes de líquido denso e uma boa concentração na separação magnética, chegando a alcançar 96% de recuperação metalúrgica no concentrado.

Palavras-chave: Pré-concentração; Jigagem; Work Index; Minério de ferro.

ABSTRACT

Pre-concentration is a stage widely used in mining and aims to enrich the ore by removing a part of the gangue. In this project, the addition of a pre-concentration stage was studied using the jig equipment in one of the ArcelorMittal company's operations. The samples studied correspond to the circulating load of the AG mill, which are: the oversize of the primary and secondary screens and, also, the middlings from cleaners spirals. The results of the jig tests were promising with the screens samples, removing an average of 15% of mass from this circuit, with an iron loss of 5%, as for the WI tests with these samples, it is observed a value without much variation comparing the head sample with the jig test concentrates, ranging from 7 to 8 kWh/t. As for the cleaner middlings from spirals, it was observed the need for a different pre-concentration route or its recirculation in another stage of the process, such as, for example, in the concentration by spirals, since it is a very different sample from the other two, thinner, with higher feed content and WI of 14.9 kWh/t. Even so, considerable results can be observed in the heavy liquid tests and a good concentration in the magnetic separation, reaching 96% metallurgical recovery in the concentrate.

Keywords: Pre-concentration; Jiggin; Work Index; Iron ore.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma da planta de beneficiamento estudada.....	13
Figura 2 Sílica liberada na carga circulante (Oversize da Peneira Secundária)	13
Figura 3 Esquema simplificado de um jigüe	17
Figura 4 Representação gráfica do circuito fechado de moagem.....	18
Figura 5 Fluxograma proposto para o projeto estudado	20
Figura 6 Fluxograma com os procedimentos realizados	21
Figura 7 Fluxograma da amostragem	22
Figura 8 Divisor Riffles	23
Figura 9 Picnômetro AccuPyc II 1340	23
Figura 10 Agitador de peneiras Sinex e peneira de 30cm	24
Figura 11 Agitador de peneiras em torre Haver EML Digital Plus.....	24
Figura 12 Britador de mandíbulas Retsch	26
Figura 13 Britador de rolos.....	26
Figura 14 Preparação das amostras para os testes de WI com amostras cabeça	28
Figura 15 Preparação das amostras para os testes de WI com os produtos dos testes de Jigüe com PP e PS	28
Figura 16 Preparação das amostras para os testes de WI com os produtos dos testes de Jigüe com os Blends.....	29
Figura 17 Moinho padrão para teste de WI	30
Figura 18 Fluxograma teste WI.....	30
Figura 19 Equipamento Jigüe AllMineral.....	32
Figura 20 Fluxograma testes de jigüe com as amostras "tal qual"	33
Figura 21 Fluxograma testes de jigüe com os Blends.....	33
Figura 22 Procedimentos do teste de Líquido Denso	35
Figura 23 Funil separador e Filtro.....	35
Figura 24 Equipamento Tubo Davis.....	36
Figura 25 WHIMS Gaustec.....	36
Figura 26 Teores de ferro e sílica nas amostras "tal qual"	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Exemplo da inversão de tendência	31
Gráfico 2 Granulometria amostras "tal qual"	39
Gráfico 3 Variação no teor de ferro e sílica – OS Peneira Primária.....	41
Gráfico 4 Variação no teor de ferro e sílica – OS Peneira Secundária	42
Gráfico 5 Variação no teor de ferro e sílica – Médios das Espirais Cleaners	42
Gráfico 6 Granulometria dos produtos do teste de jigüe com o Oversize da Peneira Primária	46
Gráfico 7 Granulometria dos produtos do teste de jigüe com o Oversize da Peneira Secundária	47
Gráfico 8 Comparação dos concentrados finais dos testes de jigüe das amostras PP e PS.....	49
Gráfico 9 Comparação dos rejeitos finais dos testes de jigüe das amostras PP e PS	49
Gráfico 10 Granulometria dos produtos do teste de jigüe com o Blend 01	50
Gráfico 11 Granulometria dos produtos do teste de jigüe com o Blend 02	52
Gráfico 12 Granulometria dos produtos do teste de jigüe com o Blend 02	53
Gráfico 13 Comparação dos resultados dos testes de jigüe com os 03 blends	54
Gráfico 14 Granulometria flotado e afundado amostra "tal qual"	55
Gráfico 15 Granulometria flotado e afundado amostra "tal qual" >106 µm	56
Gráfico 16 Resultados dos testes de Separação Magnética com os Médios das Espirais Cleaners	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Nome das amostras estudadas	19
Tabela 2 Composição em massa dos Blends com amostras das Peneiras Primária e Secundária	22
Tabela 3 Aberturas das peneiras	25
Tabela 4 Carga de moagem - Teste WI	29
Tabela 5 Parâmetros do teste WHIMS	37
Tabela 6 P ₈₀ das amostras de cabeça	39
Tabela 7 Resultado das densidades amostras "tal qual"	43
Tabela 8 Resultado WI amostras "tal qual"	43
Tabela 9 Resultado WI com os pré-concentrados do jigge gerados a partir das amostras "tal qual"	44
Tabela 10 Resultados do WI com os pré-concentrados do jigge gerados a partir dos <i>blends</i>	44
Tabela 11 Densidade dos produtos do jigge PP L1	46
Tabela 12 Resultados teste de Jigge com PP L1	46
Tabela 13 Densidade dos produtos do jigge PS L1	47
Tabela 14 Resultados teste de Jigge com PS L1	47
Tabela 15 Densidade dos produtos do jigge com o Blend 01	50
Tabela 16 Resultados teste de Jigge com o Blend 01	51
Tabela 17 Densidade dos produtos do jigge com o Blend 02	52
Tabela 18 Resultados teste de Jigge com o Blend 02	52
Tabela 19 Densidade dos produtos do jigge com o Blend 03	53
Tabela 20 Resultados teste de Jigge com o Blend 03	53
Tabela 21 Resultados teste de Líquido Denso com amostra "tal qual"	55
Tabela 22 Resultados teste Líquido Denso com amostra "tal qual" >106 µm	56
Tabela 23 Rejeito final teste separação magnética	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

OS – *Oversize*

PP – Peneira Primária

PS – Peneira Secundária

US – *Undersize*

AG - Autógeno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVOS GERAIS	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. PRÉ-CONCENTRAÇÃO.....	15
3.2. CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA.....	16
3.2.1. Jigagem	16
3.3. WORK INDEX	18
3. AMOSTRAS / DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS	19
4. METODOLOGIA	20
4.1. AMOSTRAGEM	21
4.2. DENSIDADE.....	23
4.3. PENEIRAMENTO	23
4.4. BRITAGEM	25
4.5. WORK INDEX (WI).....	26
4.6. TESTES NO JIGUE PNEUMÁTICO.....	32
4.7. TESTES EXPLORATÓRIOS AMOSTRA MÉDIOS DAS ESPIRAIS	34
4.7.1. Líquido denso	34
4.7.2. Separação Magnética	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1. GRANULOMETRIA E GRANULOQUÍMICA	38
5.2. DENSIDADE.....	42
5.3. WORK INDEX	43
5.4. JIGUE PNEUMÁTICO	45
5.4.1. Oversize das Peneiras Primária e Secundária	45
5.4.2. Blends	49
5.5. TESTE EXPLORATÓRIO MÉDIO DAS ESPIRAIS CLEANERS.....	54
5.5.1. Líquido Denso	54
5.5.2. Separação Magnética	56
6. CONCLUSÃO	58
7. REFERÊNCIAS	59

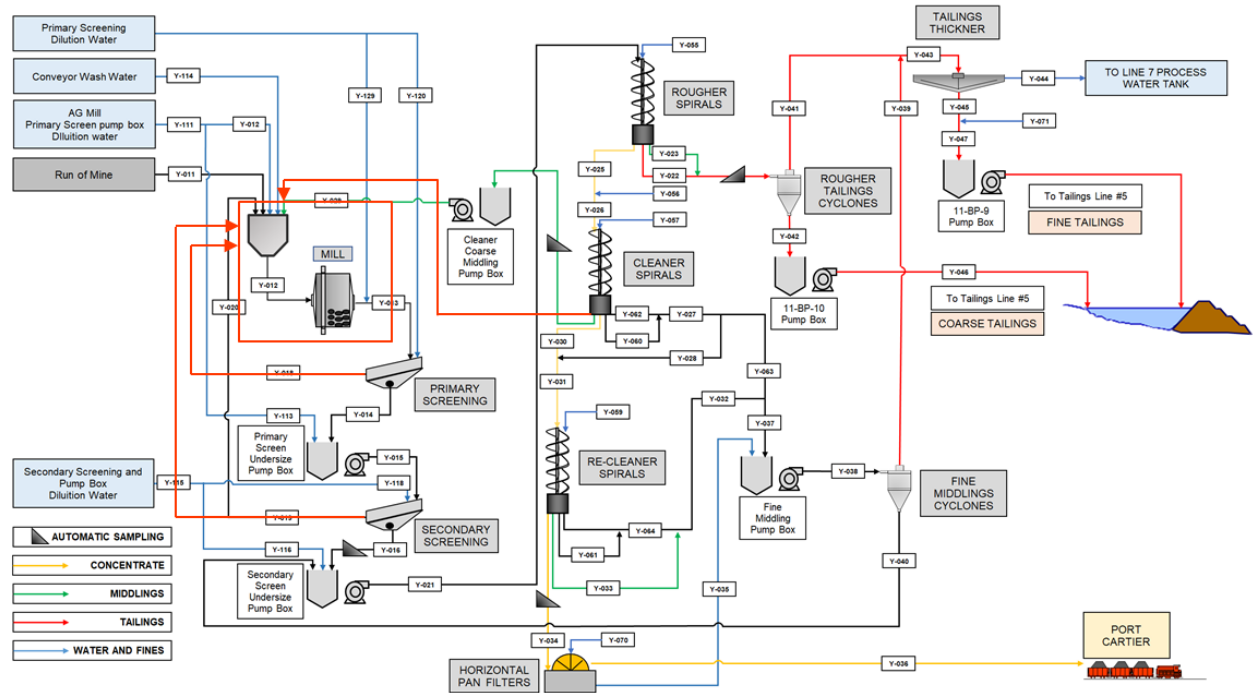
1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro objeto desse estudo é concentrado pela planta de beneficiamento da empresa ArcelorMittal de uma operação localizada no Canadá.

O circuito atual dessa planta de beneficiamento (Figura 1) é composto por oito linhas de produção. As linhas 01 a 06 possuem capacidades de 1000 a 1400 t/h, e as outras duas linhas, L7-1 e L7-2, circuitos mais recentes, com capacidades somadas de 3150 a 3450 t/h. Embora as linhas tenham sido construídas para trabalhar de forma semelhante, foram verificadas algumas diferenças nos produtos. Por esta razão, a Linha 1 é amostrada para representar das Linhas 1 a 6 e as Linhas 7-1 e 7-2 são amostradas separadamente.

O circuito começa com uma Moagem Totalmente Autógena (FAG), alimentada com o ROM mais cargas circulantes. O moinho AG está em circuito fechado com duas etapas de peneiramento. Após o peneiramento, os *oversizes* das peneiras primárias e secundárias retornam ao moinho, assim como o produto médio das espirais *cleaners* (linhas vermelhas na Figura 1). Os *undersizes* das peneiras alimentam o conjunto de concentração por espirais, composto pelas etapas *rougher*, *cleaner* e *re-cleaner*.

Figura 1 Fluxograma da planta de beneficiamento estudada



Fonte: Acervo ArcelorMittal

Uma vez que foi observada quantidade visível de ganga liberada, principalmente quartzo, nestas cargas circulantes, Figura 2, um projeto de pré-concentração com jigagem foi concebido para otimizar a etapa de moagem dessa planta de beneficiamento. Espera-se que removendo uma quantidade considerável de ganga da carga circulante dos moinhos, é possível aumentar a produção e, também, melhorar a eficiência energética.

Figura 2 Sílica liberada na carga circulante (Oversize da Peneira Secundária)



Fonte: Acervo ArcelorMittal

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste projeto é estudar a possibilidade de remoção de ganga já liberada, principalmente a sílica, da carga circulante do moinho AG, para evitar a moagem de massa desnecessária. Esperava-se a melhoria da eficiência energética da moagem e em consequência aumento da capacidade de produção.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar testes de jigge com as amostras *oversize* das peneiras primárias e secundárias e com um *blend* dessas para determinar o potencial de eliminação de ganga
- Estudar metodologias de separação gravítica e magnética com o produto médio das espirais *cleaners* para definir mais opções de concentração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PRÉ-CONCENTRAÇÃO

A pré-concentração tem o objetivo de descartar a ganga já liberada ou parcialmente liberada do minério antes de etapas dispendiosas, como moagem e flotação, dessa forma é reduzida a massa a ser alimentada nas etapas seguintes (CRESWELL, 2001). Em outras palavras, é um processo de enriquecimento do minério (GRIGG e DELEMONTEX 2015).

Essa é uma técnica amplamente empregada na mineração, de acordo com Bamber (2008) e Murphy et al (2012), essa estratégia pode viabilizar projetos até então inviáveis, pois diminui custos e maximiza a produção. Além disso, para projetos já implementados, leva ao aumento das reservas e, também, redução da massa a ser processada, com a mesma quantidade de metal a ser produzido (BERGERMAN, 2012).

É visualizado uma série de benefícios para as seguintes operações a partir desta etapa, como: em casos de WI elevado, pode-se ter a redução do consumo de energia por tonelada de metal produzido, além da diminuição do desgaste abrasivo em tubulações, rotores de bombas e revestimento de moinhos, e também impactos na flotação, como aumento de recuperação. No entanto, há sempre uma dúvida entre a recuperação (ou a perda de unidades metálicas no processo de pré-concentração) versus o custo operacional e de capital do processo (GRIGG e DELEMONTEX, 2015).

Há vastas opções de equipamentos nas etapas de pré-concentração, como flotação, peneiramento, classificação óptica, classificação por raios-x e separação por densidade. Cada uma oferece suas próprias vantagens em termos de rendimento, faixa de tamanho de alimentação, custo de capital e custo operacional (GRIGG e DELEMONTEX, 2015). De todos os métodos disponíveis, é comumente implantada a separação gravítica (SMIT et al, 2012).

3.2. CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA

A concentração gravítica é um dos mais antigos métodos de processamento mineral. Ela pode ser definida como a separação de partículas em diferentes densidades, tamanhos e formas a partir da força da gravidade ou forças centrífugas (Luz, 2010).

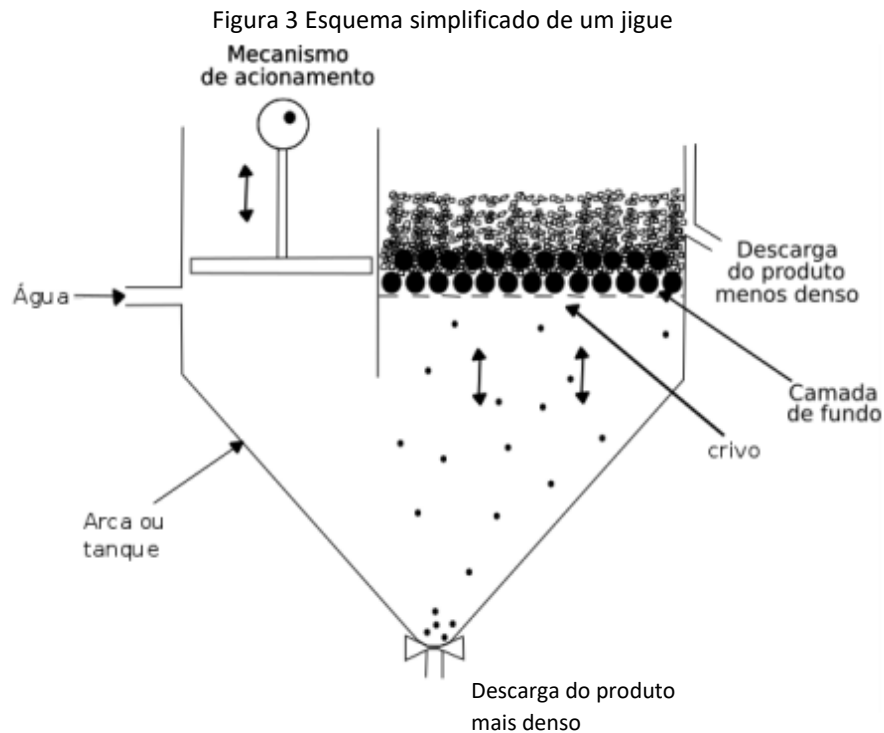
Ao longo da história, esse tipo de concentração perdurou como método principal por cerca de 2000 anos e teve seu declínio apenas no século 20, com a ascensão de processos como a flotação e concentração magnética que, por sua vez, possibilitaram o tratamento seletivo de minérios mais complexos e de baixo teor (WILLS, 2006).

3.2.1. Jigagem

A jigagem é um dos métodos de concentração gravítica e, por meio da separação hidráulica, consiste na expansão (dilatação) e contração (compactação) vertical do leito de partículas pelo movimento de um fluido, geralmente, a água. Esses movimentos ocasionam uma estratificação no leito, ou seja, a separação das partículas em várias camadas com densidade crescente no sentido do topo até a base do equipamento (Sampaio e Tavares, 2005).

O equipamento pneumático faz uma expansão e contração vertical do material através da pulsação da água e, desta forma, as partículas ficam sob a força da gravidade, reorganizando-se em múltiplas bandas, separando as partículas mais leves e menores das mais densas e maiores. (AMBRÓS, 2020).

Existem diferentes tipos de jigues, mas são compostos essencialmente por elementos básicos representados na Figura 3 abaixo, pelo modelo tipo Denver.



Fonte: Sampaio e Tavares, 2005

Basicamente o equipamento é formado por um grande tanque, denominado arca, que é dividido em duas seções. Uma delas contém o crivo, que é uma tela que suporta o leito das partículas quando ocorre a estratificação. Na outra seção é gerado as pulsões do fluido. Essas pulsões podem ser produzidas de diferentes maneiras, mecanicamente por meio de um êmbolo ou por pulsação da água ou do ar (Luz, 2010).

Segundo Tomáz (2015), as variáveis operacionais dos jigues são a amplitude e frequência das pulsões, percentagem de sólidos, a camada de fundo e a granulometria da alimentação.

As principais vantagens deste equipamento são: baixo custo operacional, elevada capacidade produtiva, simples operação, admissão de alimentação com ampla diversidade granulométrica, grandes flutuações de teores e percentagens de sólidos (Sampaio e Tavares, 2005).

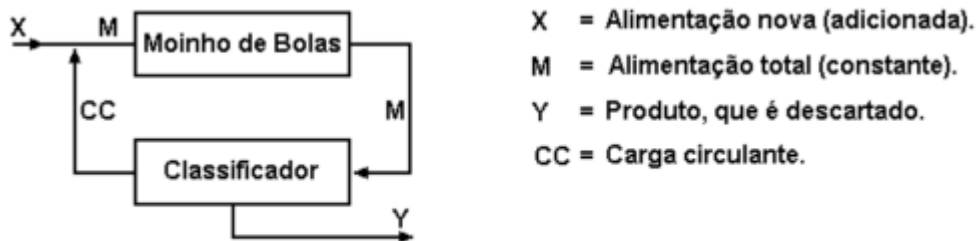
3.3. WORK INDEX

O método WI de Bond possui um procedimento padrão e é amplamente utilizado para mensurar a moabilidade de minérios. É de simples realização e possui um grau razoável de acurácia para muitas aplicações, mesmo sendo um método empírico, pois foi baseado em medidas industriais (FERREIRA et al, 2015).

O cálculo do WI representa em kWh/t a energia necessária para moer o minério a uma determinada granulometria, em outras palavras, representa a resistência do minério à moagem. É também um importante fator para o dimensionamento de moinhos de bolas (HERBST et al., 2003).

A Figura 4 representa o desenho esquemático dos testes de WI, em suma, é uma moagem conduzida a seco, em circuito fechado, com a carga circulante em 250% quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio (BARBATO e SAMPAIO, 2010)

Figura 4 Representação gráfica do circuito fechado de moagem



Fonte: BARBATO e SAMPAIO, 2010

3. AMOSTRAS / DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS

Conforme comentado anteriormente, este projeto trabalha com nove amostras diferentes: Oversize da Peneira Primária, Oversize da Peneira Secundária e o produto Médio das Espirais Cleaners de três linhas da amostragem na planta de beneficiamento estudada. Na Tabela 1 pode ser visualizado a denominação de cada amostra.

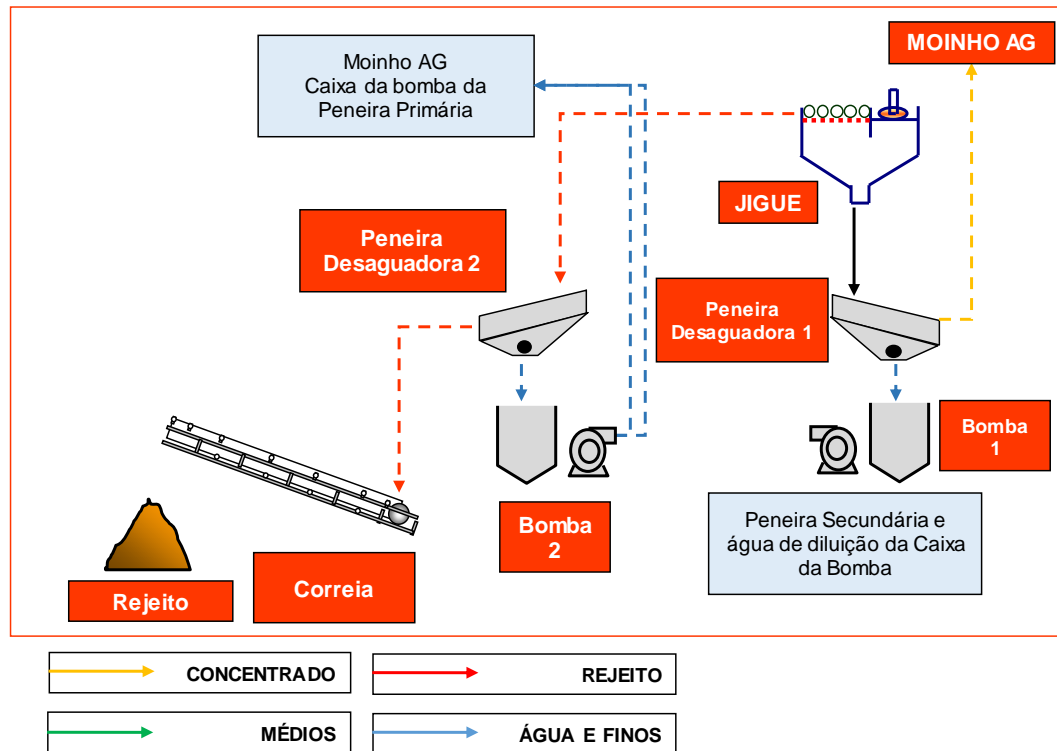
Tabela 1 Nome das amostras estudadas

Nome das amostras	
Oversize Peneira Primária	L1
Oversize Peneira Secundária	L1
Médio das Espirais <i>Cleaners</i>	L1
Oversize Peneira Primária	L7-1
Oversize Peneira Secundária	L7-1
Médio das Espirais <i>Cleaners</i>	L7-1
Oversize Peneira Primária	L7-2
Oversize Peneira Secundária	L7-2
Médio das Espirais <i>Cleaners</i>	L7-2

Para conceber uma rota complementar, representando a pré-concentração, foi considerado um equipamento para processar o material e, simultaneamente, compor um processo com o mínimo de unidades possível. Em razão dos tamanhos e teores das amostras, optou-se por um equipamento jigue como concentrador, pois sua faixa ótima de trabalho é de 6 mm a 0,15 mm. (VALADÃO & ARAÚJO, 2012).

O circuito proposto inicia-se com a carga circulante alimentando o equipamento jigue, que resulta em dois produtos, o concentrado que vai para uma peneira desaguadora e depois retorna ao circuito atual alimentando o moinho AG, e o rejeito que também vai para uma peneira desaguadora antes do descarte. O circuito está representado na Figura 5.

Figura 5 Fluxograma proposto para o projeto estudado

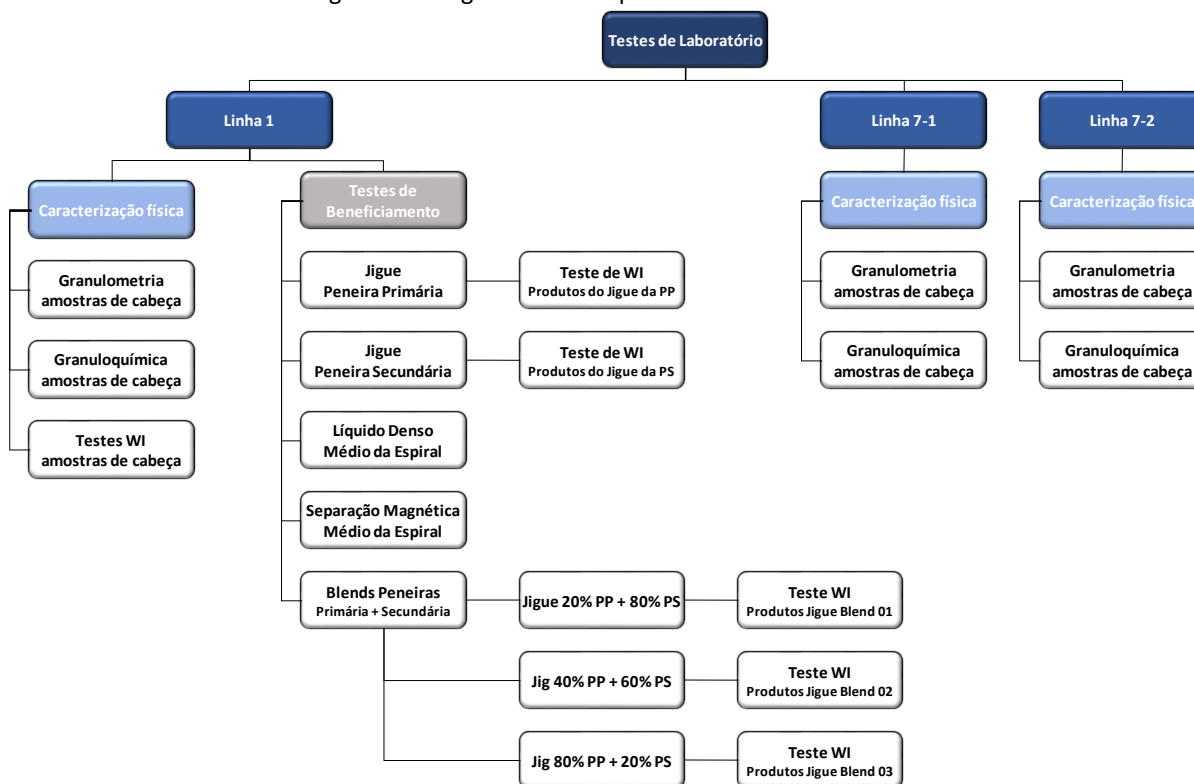


Fonte: Acervo ArcelorMittal

4. METODOLOGIA

Os testes que foram realizados com cada uma das nove amostras podem ser vistos na Figura 6. Este trabalho descreve a granulometria e granuloquímica de todas as nove amostras, enquanto os testes de beneficiamento foram realizados apenas com as amostras da Linha 1.

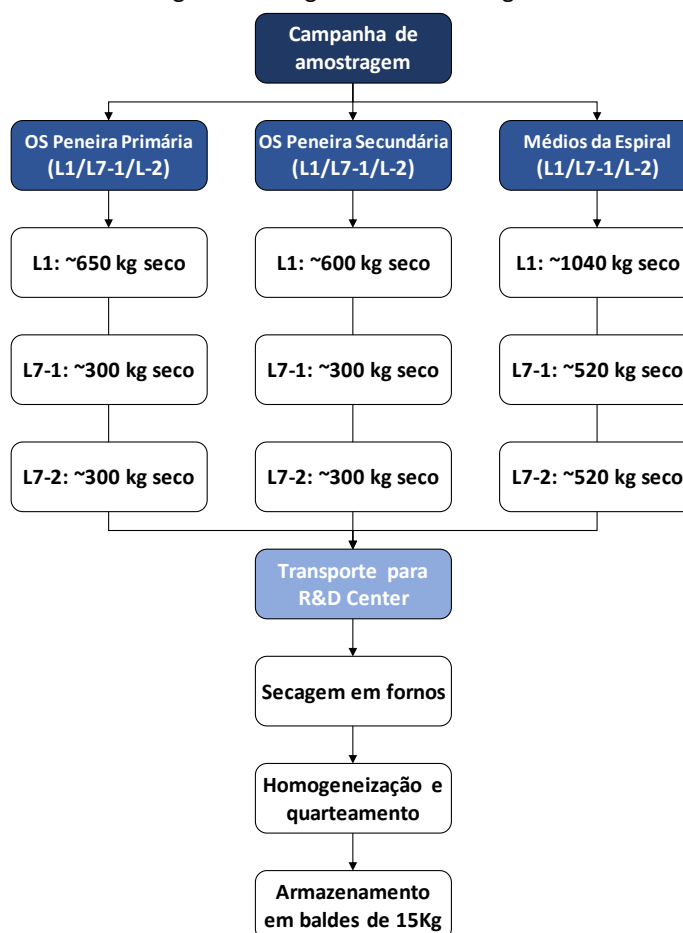
Figura 6 Fluxograma com os procedimentos realizados



4.1. AMOSTRAGEM

Conforme mostra o fluxograma da Figura 7, as nove amostras foram transportadas para o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento ArcelorMittal Maizières, secas em estufas, homogeneizadas em pilhas, amostradas e armazenadas em baldes com cerca de 15 Kg cada.

Figura 7 Fluxograma da amostragem



Em seguida, foram elaborados três blends com as amostras Oversizes das Peneiras Primária e Secundária da linha L1. As composições de massa são mostradas na Tabela 2. Essas proporções foram definidas com base no último balanço de massa feito para o estudo *Mine to Mill* (HATCH, 2019) realizado nessa mesma planta de beneficiamento, em que a proporção da vazão da peneira primária em relação à vazão da peneira secundária foi de 40% e 60%, respectivamente. A outra proporção foi com o objetivo de estudar duas opções extremas. A homogeneização, quarteamento e composição dos blends foram feitos com auxílio do Divisor Riffles, Figura 8.

Tabela 2 Composição em massa dos Blends com amostras das Peneiras Primária e Secundária

Amostra	Massa (%)	
	PP	PS
BLEND 01	20%	80%
BLEND 02	40%	60%
BLEND 03	80%	20%

Figura 8 Divisor Riffles



4.2. DENSIDADE

A densidade foi medida por um picnômetro modelo AccuPyc II 1340 (Figura 9). Foram utilizados cerca de 10 gramas em cada medida e o resultado é medido em triplicata.

Figura 9 Picnômetro AccuPyc II 1340



4.3. PENEIRAMENTO

O peneiramento foi realizado utilizando-se dois equipamentos escolhidos de acordo com a quantidade de material e se o procedimento seria realizado a seco ou a úmido. Foi utilizado o Agitador de Peneiras Sinex, Figura 10, para peneiramento de massas >0,5 kg ou peneiramento úmido. E o Agitador de Peneiras em torre EML, a Figura 11, ao peneirar menos de 0,5 kg de massa ou ao realizar peneiramento a seco.

Figura 10 Agitador de peneiras Sinex e peneira de 30cm



Figura 11 Agitador de peneiras em torre Haver EML Digital Plus



As aberturas das malhas das peneiras para o peneiramento estão descritas na Tabela 3. A série foi adaptada de acordo com o “*top size*” dos produtos.

Tabela 3 Aberturas das peneiras

Tamanho (μm)
50000
35500
25000
19000
12500
10000
6300
4750
3350
2360
1700
1180
850
600
425
300
212
150
106
75
53
38
< 38

4.4. BRITAGEM

A britagem foi realizada em dois equipamentos, o britador de mandíbulas Retsch (Figura 12) para a amostra mais grossa, Oversize da Peneira Primária (acima de 10 mm), e o britador de rolos para as demais amostras (normalmente abaixo de 10 mm) (Figura 13).

Figura 12 Britador de mandíbulas Retsch



Figura 13 Britador de rolos



4.5. WORK INDEX (WI)

Em geral, os testes de “*Work Index*” são realizados com malhas de 0,10 ou 0,15 mm como referência. Na usina estudada, a referência foi no tamanho de 0,6 mm, já que o produto da moagem é P_{80} em 0,6 mm.

Para preparar os testes, 20Kg de cada amostra foram britados até que 100% da massa fosse passante em 3,35 mm, seguindo as regras ABNT (1990) para o teste de WI. Conforme mostram os fluxogramas abaixo, o procedimento de britagem foi diferente para cada amostra devido ao tamanho do material. A britagem da amostra da Peneira Primária, mais grossa, foi realizada com o britador de mandíbulas (Figura 12) iniciando com o maior GAP em 46 mm e diminuindo 5 mm a cada britagem até atingir um GAP de 3 mm. Após cada etapa foi realizado peneiramento, para remover o material abaixo de 3,35 mm e evitar a britagem excessiva.

Para a amostra da Peneira Secundária foi utilizado um britador de rolos (Figura 13), pois o “*top size*” era menor que a abertura mínima do britador de mandíbulas. O primeiro GAP foi de 2,0 mm, após 1,5 mm e para o último estágio de britagem, 0,8 mm. Da mesma forma que para a amostra da peneira primária, realizou-se peneiramentos entre as etapas de britagem.

A amostra das Espirais Cleaners já estava inferior a 3,35 mm, não necessitando de britagem.

Realizou-se teste de WI também com os produtos dos testes realizados no equipamento jigge. Primeiramente, foi preparado um *blend* com os produtos concentrado e médio (formando o “pré-concentrado”). Posteriormente, o mesmo procedimento de britagem foi feito com essas amostras. Com o pré-concentrado gerado a partir da amostra da Peneira Primária, foi utilizado o britador de mandíbulas e para a Peneira Secundária, o britador de rolos (Figura 13).

Já para os pré-concentrados do jigge gerados a partir dos três *blends* compostos, descritos no capítulo de amostragem, utilizou-se o britador de mandíbulas (Figura 12).

Após as britagens, foi pesado numa proveta de 700 mL o que representou a massa inicial dos testes de WI. Com esta massa foi realizado uma granulometria para saber o valor de F_{80} (diâmetro em que 80% das partículas são passantes na malha de referência).

Segundo Bergstrom (1985), se o percentual de massa que passa na malha de referência do ensaio for superior a 28%, é necessário fazer um “scalping”, que consiste em retirar o *undersize* da peneira de referência e adicionar nova alimentação, até atingir menos de 28% passante. O procedimento de *scalping* foi necessário para as amostras “tal qual” da Peneira Primária e os Médios das Espirais Cleaners.

Os procedimentos realizados para as amostras “tal qual” estão descritos na Figura 14, para os pré-concentrados dos jigues com as amostras “tal qual” na Figura 15 e para os pré-concentrados dos jigues gerados a partir dos *blends* na Figura 16.

Figura 14 Preparação das amostras para os testes de WI com amostras cabeça

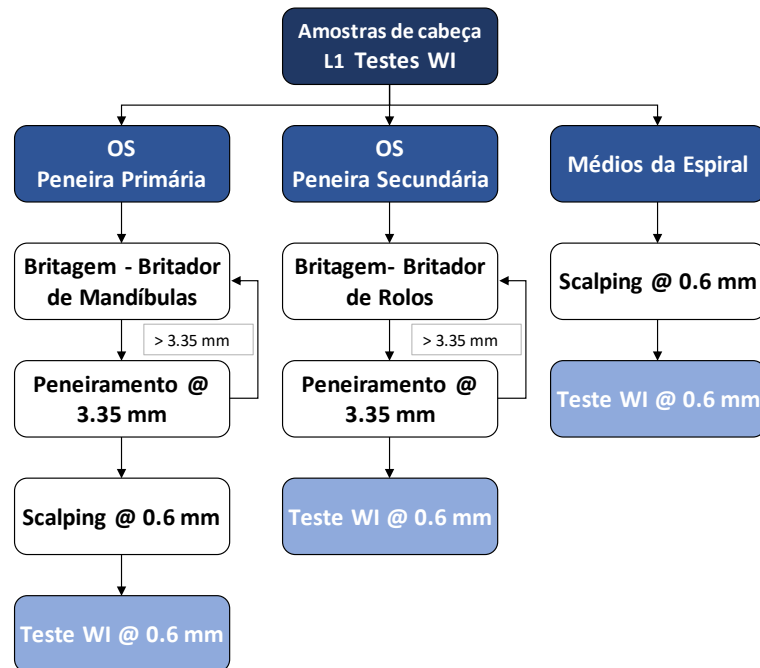


Figura 15 Preparação das amostras para os testes de WI com os produtos dos testes de Jigue com PP e PS

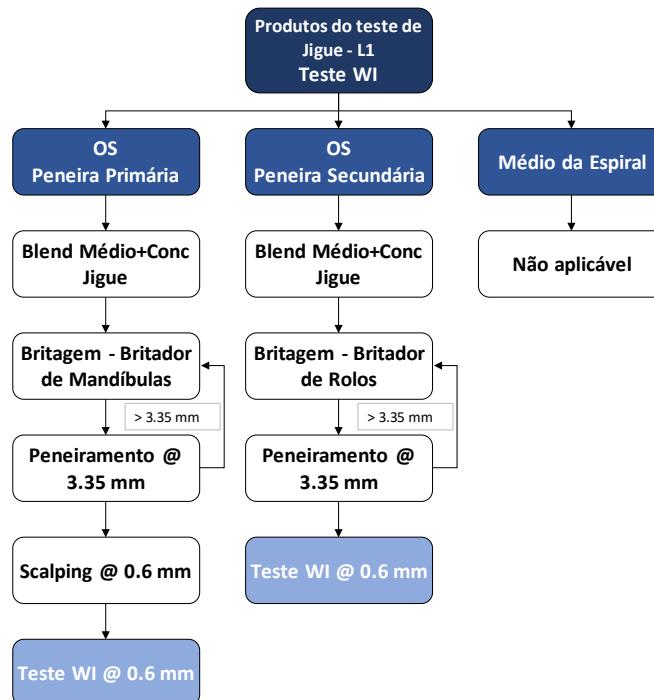
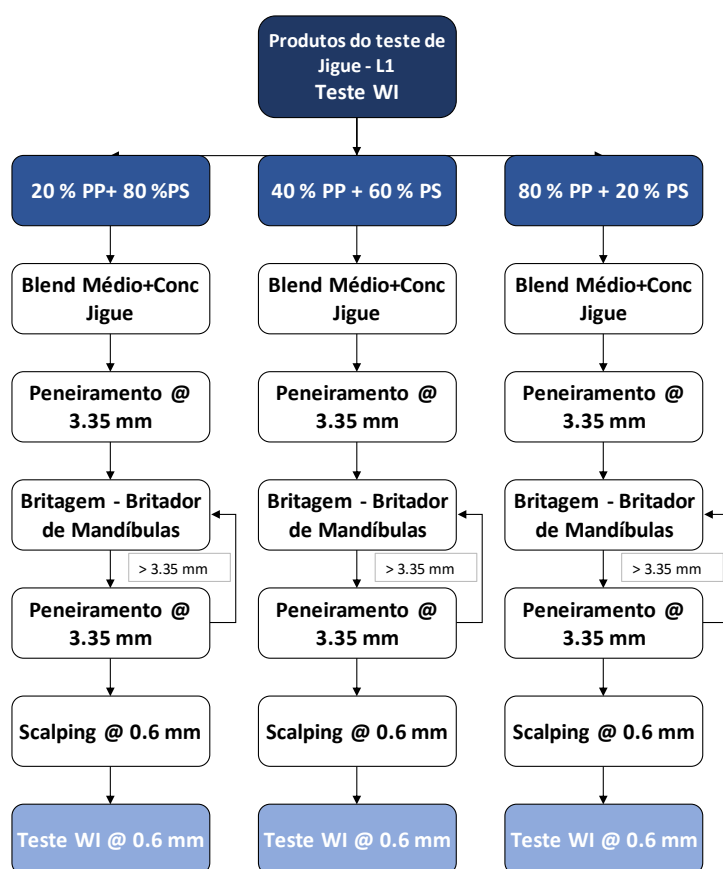


Figura 16 Preparação das amostras para os testes de WI com os produtos dos testes de Jigue com os Blends



Um dos parâmetros fixos no teste WI é a carga de moagem (Tabela 4) que consiste em 285 bolas de ferro pesando em torno de 20,0 kg.

Tabela 4 Carga de moagem - Teste WI

Número de bolas	Diâmetro (mm)
43	36,5
67	30,2
10	25,4
71	19,1
94	15,9

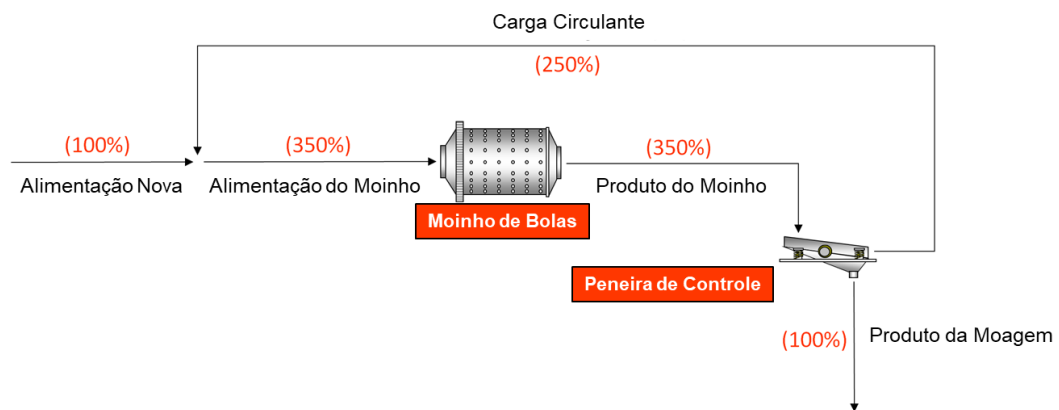
Os testes do Work Index foram realizados seguindo os procedimentos WI, conforme (ABNT, 1990) e (SAMPAIO, FRANÇA e BRAGA, 2007). A Figura 17 mostra o moinho de bolas utilizado para os testes e o fluxograma é apresentado na Figura 18. Para todas as amostras o número de revoluções para o primeiro ciclo foi de 30.

Figura 17 Moinho padrão para teste de WI



Fonte: acervo ArcelorMittal

Figura 18 Fluxograma teste WI



Fonte: Acervo ArcelorMittal

O teste foi concluído quando um dos critérios de parada foi atingido. Foi definida uma hierarquia para decidir quando interromper o teste, sendo:

1. Realizar no mínimo 05 ciclos.
2. Attingir o equilíbrio.
3. Se o equilíbrio não for alcançado até o 10º ciclo, usar a inversão de tendência como critério de parada.

O equilíbrio é alcançado se a diferença entre a moabilidade (g/revolução) máxima e mínima dos últimos três ciclos for inferior a 3% da média aritmética da moabilidade dos três últimos ciclos, conforme mostrado na Equação 1.

Equação 1 Valor de equilíbrio

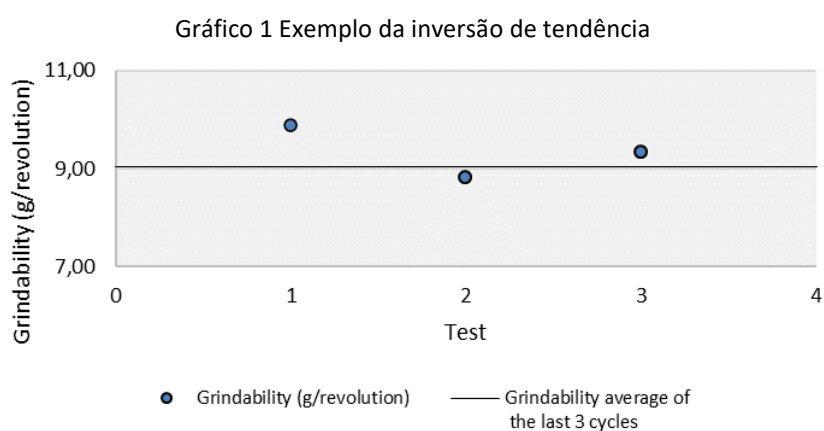
$$(Gpb_{maximum} - Gpb_{minimum}) < 3\% \times Gpb_{average}$$

$Gpb_{maximum}$ = Valor máximo da moabilidade

$Gpb_{minimum}$ = Valor mínimo da moabilidade

$Gpb_{average}$ = Média aritmética da moabilidade

A inversão da tendência ocorre quando o valor da moabilidade aumenta e/ou diminui nos três últimos ciclos, conforme mostra o Gráfico 1.



Fonte: Acervo ArcelorMittal

Se o critério de inversão de tendência for atingido em mais de um ciclo, antes do 10º ciclo, é necessário escolher qual o melhor ciclo a ser utilizado para calcular o número do Work Index. Segundo Tague e Mosher (2001), definir a melhor inversão de tendência é calcular a diferença entre os valores de moabilidade máxima e mínima dos últimos três ciclos e verificar em qual deles está mais próximo de 3% da média aritmética da moabilidade dos últimos três ciclos. Em outras palavras, qual ciclo de inversão de tendência está mais próximo do valor de equilíbrio.

Ao final do teste, foi realizado uma granulometria com o *undersize* do último ciclo, definido pelo critério de parada coerente (equilíbrio ou inversão de tendência) para, então, obter o P_{80} passando na malha de referência e calcular o WI a partir da equação 2.

Equação 2 Equação do Work Index

$$Wi = \frac{44.5}{(P_1)^{0.23}(Gbp)^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)}$$

Wi = Working Index (kWh/sh.t)

P1 = Tamanho da peneira de referência (μm)

Gbp = Moabilidade (g/rot)

P = Diâmetro com 80% das partículas do produto passantes (μm)

F = Diâmetro com 80% das partículas da alimentação passantes (μm)

4.6. TESTES NO JIGUE PNEUMÁTICO

O equipamento Jigue (Figura 19) trabalha com tamanhos mais grossos, de 6,0 mm a 0,15 mm (VALADÃO & ARAUJO, 2012), portanto, optou-se por realizar testes apenas com as amostras Oversize das Peneiras Primária e Secundária e com os três blend de ambas. A amostra Médio das Espirais *Cleaners* é muito fina para realizar testes em Jigue e este método não foi aplicado a esta amostra.

Figura 19 Equipamento Jigue AllMineral



O procedimento realizado nos testes de Jigue está descrito na Figura 20 para as amostras de cabeça e na Figura 21 para os *blends*. Em resumo, cerca de 20 Kg foi colocado

dentro do recipiente cúbico jigüe, ou seja, no interior das gavetas do equipamento, preenchido com água até cobrir o material, e, por 15 minutos, foi submetido a pulsações em torno de 61 Hz de frequência e amplitudes de 6,5 a 6 cm. Os produtos gerados foram divididos em três: rejeitos, médios e concentrados, ordenados do topo à base das gavetas. O *undersize*, material passante ao crivo, foi considerado separadamente, dependendo da abertura do crivo do Jigüe, que ficou abaixo de 4 mm para a amostra da Peneira Primária e 1 mm para a Peneira Secundária e Blends. A abertura do crivo foi definida com base na quantidade de finos de cada amostra.

Figura 20 Fluxograma testes de jigüe com as amostras “tal qual”

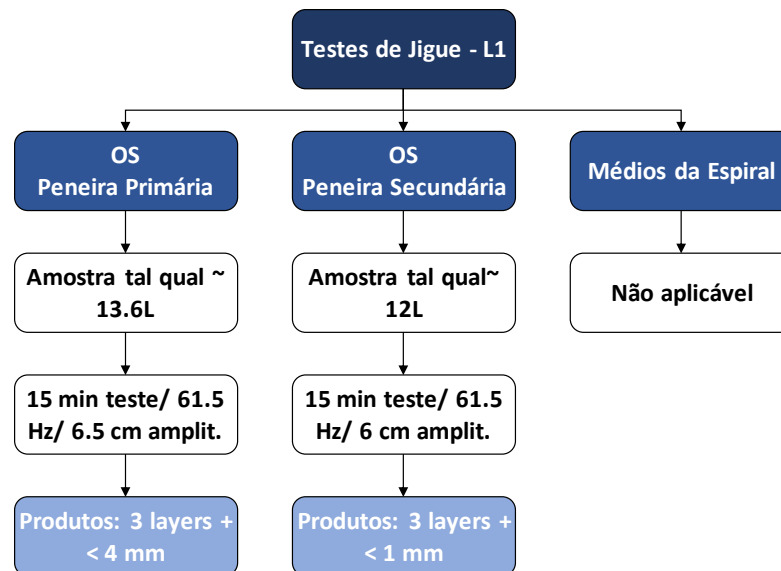
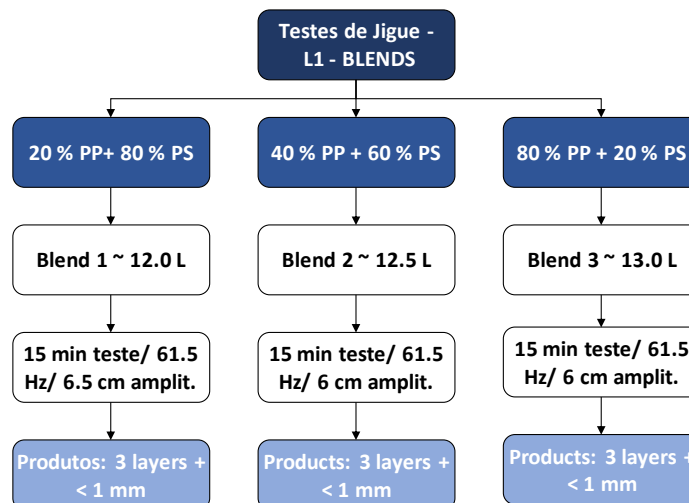


Figura 21 Fluxograma testes de jigüe com os Blends



4.7. TESTES EXPLORATÓRIOS AMOSTRA MÉDIOS DAS ESPIRAIS

Testes exploratórios foram realizados com a amostra Médio das Espirais Cleaners, já que a granulometria desta amostra era muito inferior a ideal para os trabalhos em jig, com P_{80} médio 6x menor que o limite granulométrico inferior do equipamento. Além de estudar, também, outras possibilidades de rotas.

4.7.1. Líquido denso

O primeiro teste realizado foi o de líquido denso para avaliar o desempenho desta amostra com métodos de separação gravítica.

Os testes foram realizados com duas amostras, com o oversize do peneiramento em 0,10 mm ($>0,10$ mm) e outra contendo todas as faixas de tamanho ($< 3,35$ mm, a amostra “tal qual”). O objetivo foi analisar a influência de partículas mais finas ($< 0,10$ mm) no desempenho dos métodos gravitacionais. Foram usados cerca de 50g de cada.

A metodologia de todos os testes está representada na Figura 22. O líquido denso utilizado neste caso foi o LST que é uma solução de heteropolitungstato de lítio diluídos em água. O líquido foi evaporado para atingir uma densidade de aproximadamente 2,96 g/ml.

Este líquido é misturado com a amostra dentro de um funil separador (Figura 23) e deixado em repouso por 15 minutos para permitir a separação entre o flotado (menos denso que 2,96 g/ml) do afundado (mais denso que 2,96 g/ml).

Figura 22 Procedimentos do teste de Líquido Denso

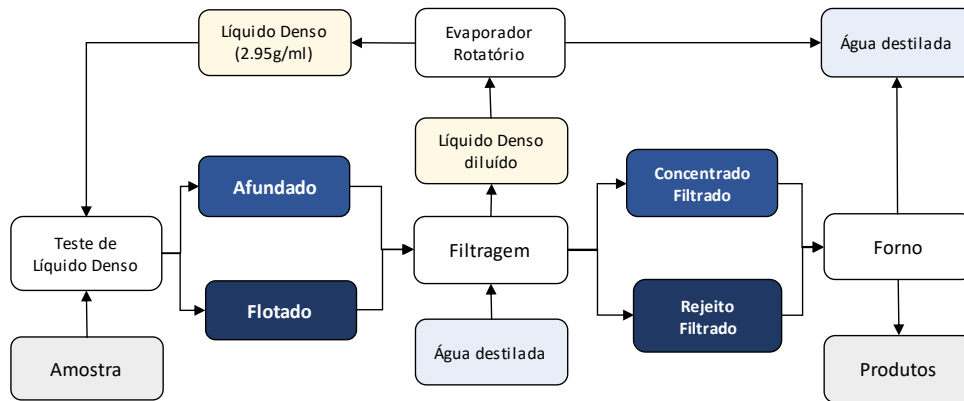


Figura 23 Funil separador e Filtro



4.7.2. Separação Magnética

O outro teste realizado foi uma varredura magnética. Na primeira etapa foi utilizado o Tubo Davis (Figura 24), que é um equipamento de laboratório constituído por um tubo de vidro inclinado colocado entre um campo eletroímã.

Uma polpa é formada dentro do tubo, as partículas não magnéticas são recuperadas na extremidade inferior do tubo e as partículas magnéticas presas entre os polos das bobinas, dentro do tubo de vidro, que são recuperadas quando o campo é desligado e o teste é finalizado. O teste foi realizado sob um campo de 1500 Gauss.

Figura 24 Equipamento Tubo Davis



O rejeito dessa etapa alimentou os próximos estágios da separação magnética e cada rejeito gerado alimentou o próximo estágio. Para campos magnéticos acima de 1500 G foi utilizado um *Wet High Intensity Magnet Separator* (WHIMS) da empresa Gaustec em processo de batelada (Figura 25). Os parâmetros são mostrados na Tabela 5.

Basicamente, a polpa passa por dentro de uma matriz que é colocada entre um campo magnético. As partículas não magnéticas são lavadas e recuperadas em um balde e quando o campo magnético é desligado, as partículas magnéticas são recuperadas.

Figura 25 WHIMS Gaustec

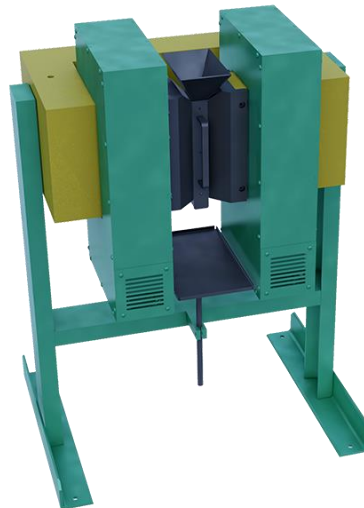


Tabela 5 Parâmetros do teste WHIMS

Parâmetro	Valor
GAP da Matriz (mm)	2,5
Campo Magnético 1 (G)	3000
Campo Magnético 2 (G)	6000
Campo Magnético 3 (G)	9000
Campo Magnético 4 (G)	12000

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes realizados com amostras de cabeça e os *blends* podem ser visualizados abaixo.

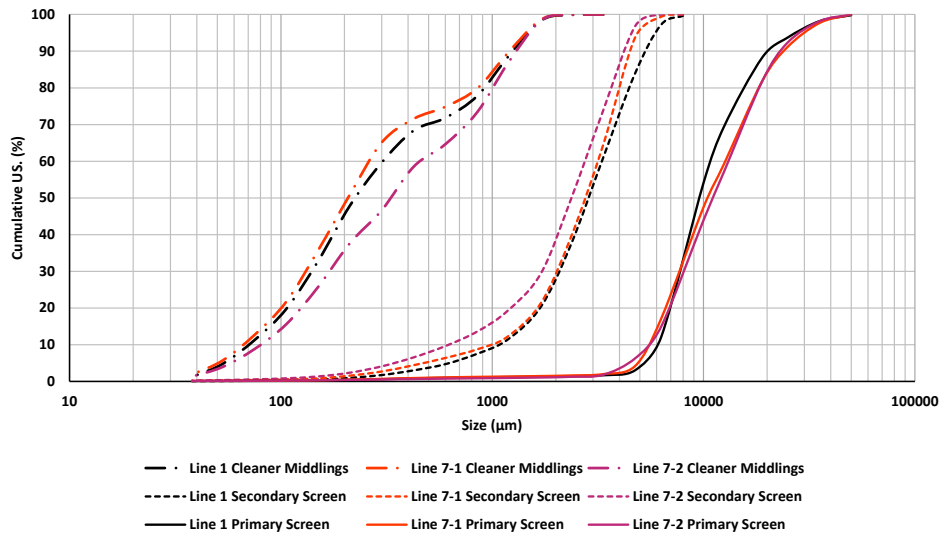
5.1. GRANULOMETRIA E GRANULOQUÍMICA

A Tabela 6 e o Gráfico 2 mostra a granulometria das nove amostras. Conforme apresentado anteriormente, o *Oversize* da Peneira Primária é a amostra mais grosseira, com D_{80} médio em 18,0 mm, o D_{80} médio da Peneira Secundária é de 4,10 mm, cerca de 4 vezes menor que a Peneira Primária, e a amostra dos Médios das Espirais *Cleaners* é a amostra mais fina com D_{80} médio em 0,95 mm.

Tabela 6 P₈₀ das amostras de cabeça

Amostra	P80 (mm)		
	L1	L7-1	L7-2
Peneira Primária L1	16,26	18,70	18,73
Peneira Secundária L1	4,52	4,12	3,78
Médio das Espirais L1	0,94	0,88	1,03

Gráfico 2 Granulometria amostras "tal qual"

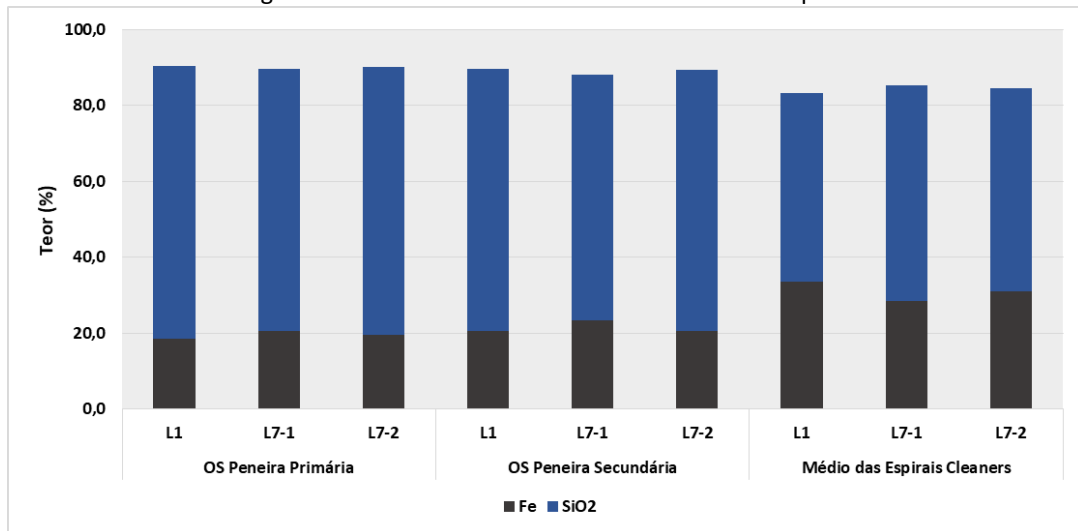


Fonte: Arquivo ArcelorMittal

Em termos de teor total de ferro para as três linhas, as amostras das Peneiras Primária e Secundária têm teores semelhantes em torno de 20%, e a média dos Médios das Espirais tem teor superior, cerca de 30%, conforme esperado (Figura 26).

Quanto ao teor de sílica, a tendência é oposta, para as Peneiras Primária e Secundária, o teor de sílica é maior, em torno de 70% e o Médio das Espirais Cleaners é menor, cerca de 53% (Figura 26).

Figura 26 Teores de ferro e sílica nas amostras "tal qual"



O Gráfico 3, Gráfico 4 e Gráfico 5 apresentam os teores de ferro e sílica por tamanho para as amostras da Peneira Primária, Peneira Secundária e Médios das Espirais Cleaners, respectivamente.

É notável para a Peneira Primária que na faixa de 1180 μm a 300 μm , o teor de ferro aumenta até um valor máximo de 40% e o teor de sílica diminui para um valor mínimo de 40% (Gráfico 3).

Para a Peneira Secundária, Gráfico 4, essa tendência ocorre duas vezes, entre a faixa de 850 μm a 425 μm e de 106 μm a 53 μm , o teor de ferro aumenta para 30% e o teor de sílica diminui para 50%. Nos tamanhos mais grosseiros de ambas amostras, >1700 μm , os teores de ferro e sílica são 20% e 70%, respectivamente.

Para os Médios das Espirais Cleaners, Gráfico 5, há uma inversão dos teores de ferro e sílica para os tamanhos de 425 μm a 75 μm , faixa de melhor performance das espirais. Diferentemente das demais amostras, o teor de ferro é maior, >50%, no tamanho grosseiro (>600 μm).

Gráfico 3 Variação no teor de ferro e sílica – OS Peneira Primária

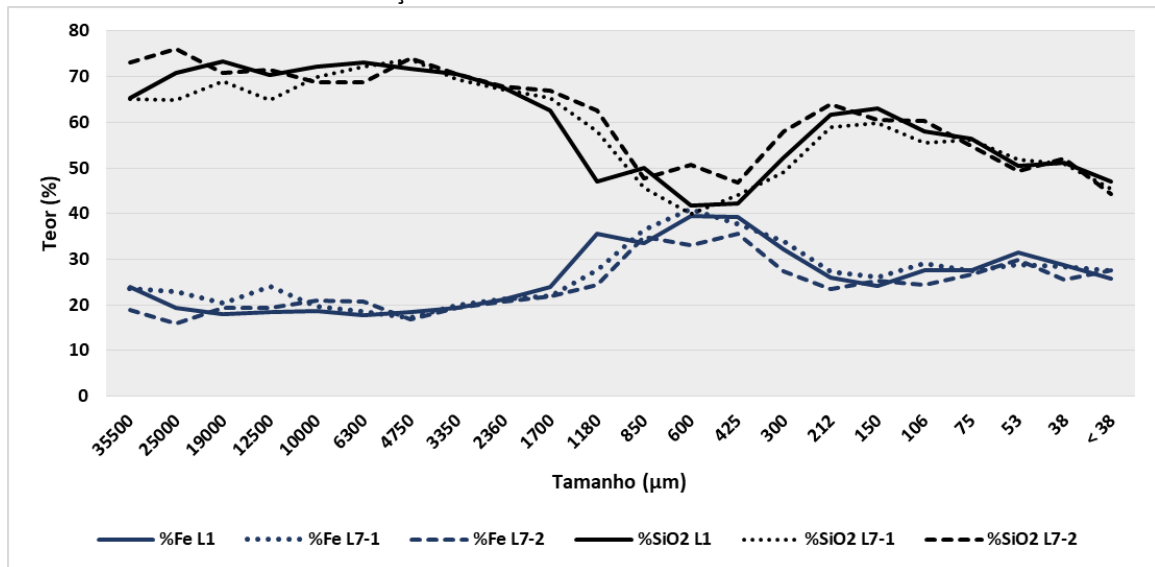


Gráfico 4 Variação no teor de ferro e sílica – OS Peneira Secundária

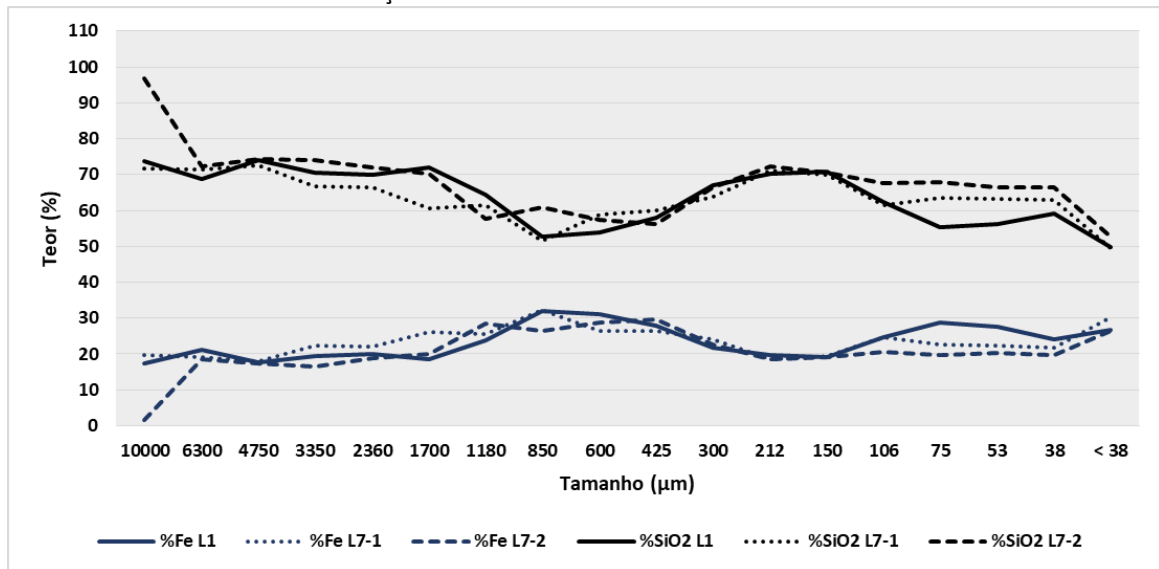
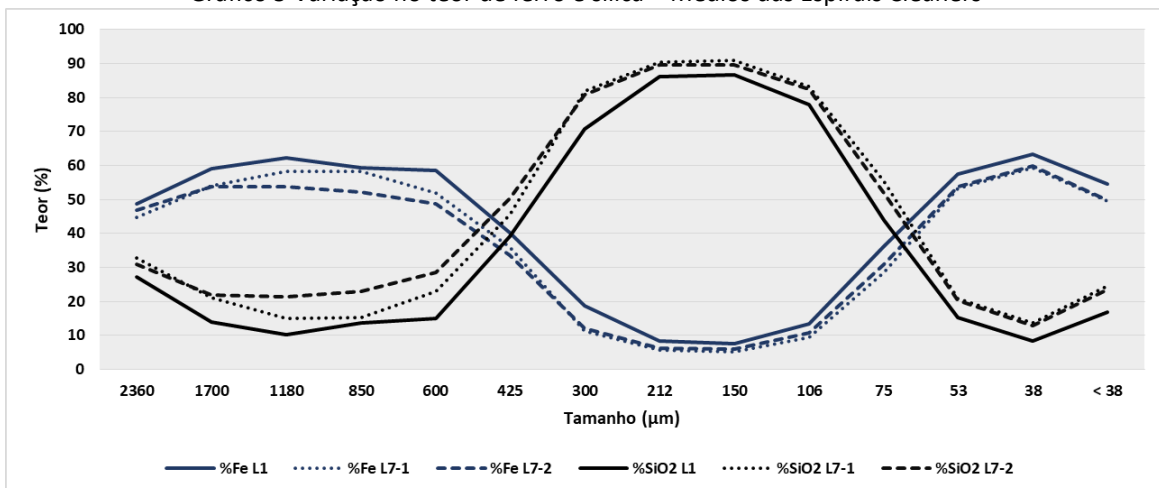


Gráfico 5 Variação no teor de ferro e sílica – Médios das Espirais Cleaners



5.2. DENSIDADE

As densidades das três amostras “tal qual” são semelhantes, conforme mostrado na Tabela 7. Ambas amostras, Peneira Primária e Secundária, têm o mesmo valor ($3,19 \text{ g/cm}^3$) e o Médio das Espirais Cleaners tem a densidade mais alta, ($3,56 \text{ g/cm}^3$), como esperado, já que é a amostra com maior teor de ferro.

Tabela 7 Resultado das densidades amostras "tal qual"

Densidade	(g/cm ³)
OS Peneira Primária	3,19
OS Peneira Secundária	3,19
Médio das Espirais Cleaners	3,56

5.3. WORK INDEX

Os resultados do teste Work Index com as amostras "tal qual" estão resumidos na Tabela 8.

Os valores de WI com P₈₀ a 600µm das amostras Oversize das Peneiras Primária e Secundária são bastante semelhantes, 8 kWh/te 8,16 kWh/t, respectivamente, e o Médio das Espirais Cleaners possui maior valor, 14,92 kWh/t.

Tabela 8 Resultado WI amostras "tal qual"

Parâmetro	Valor		
	PP L1	PS L1	Médio das Espirais L1
Porcentagem <600µm na alim (%)	42,6	16,0	17,0
Scalping aplicado (?)	Sim	Não	Sim
Alimentação F80 (µm)	2109	2714	2714
Produto P80 (µm)	462	487	487
Número de ciclos	6	6	10
Média da moabilidade (g/rev)	8,13	7,99	5,41
Critério de Parada	Reversão de Tendência	Equilíbrio	Reversão de Tendência
WI (kWh/t)	8,00	8,16	14,92

Os valores do WI dos pré-concentrados dos testes do jigge de ambas as Peneiras Primária e Secundária são resumidos na Tabela 9.

Para a Peneira Primária, o valor diminuiu em relação à amostra de cabeça, 7,47 kWh/t contra 8,0 kWh/t. Para a Peneira Secundária, o pré-concentrado do jigge é maior que a amostra original, 8,32 kWh/t contra 8,16 kWh/t. Mais testes de WI devem ser executados no futuro para confirmar eventuais tendências de diminuição ou aumento dos valores e para avaliar a economia de consumo de energia.

Tabela 9 Resultado WI com os pré-concentrados do jigge gerados a partir das amostras "tal qual"

Parâmetro	Valor	
	PP L1 - Jigue	PS L1 - Jigue
Porcentagem <600µm na alim (%)	42,6	16,0
Scalping aplicado (?)	Sim	Sim
Alimentação F80 (µm)	2109	2714
Produto P80 (µm)	462	487
Número de ciclos	8	9
Média da moabilidade (g/rev)	9,04	7,42
Critério de Parada	Equilíbrio	Equilíbrio
WI (kWh/t)	7,47	8,32

Abaixo estão apresentados os resultados do WI realizado com os pré-concentrados (concentrado+médios) dos testes de jigge alimentado com os *blends*. Conforme apresentado anteriormente, o Blend 1 contém maior proporção de amostra da Peneira Secundária do que da Peneira Primária (80% e 20%), e o oposto para o Blend 3 (80% e 20%). O Blend 2 possui 40% de massa da Peneira Primária e 60% da Secundária.

Não foi observada grande variação entre os resultados de WI com os Blends, pois os valores variaram de 7,69 kWh/t do Blend 3 a 8,22 kWh/t do Blend 2, o Blend 1 foi de 8,06 kWh/t (Tabela 10). 1 kWh/t é muito

Tabela 10 Resultados do WI com os pré-concentrados do jigge gerados a partir dos *blends*

Parâmetro	Value		
	BLEND 01 20PP 80PS - jigge	BLEND 02 40PP 60PS - jigge	BLEND 03 80PP 20PS - jigge
Porcentagem <600µm na alim (%)	25,4	30,5	40,9
Scalping aplicado (?)	Sim	Sim	Sim
Alimentação F80 (µm)	2670	2645	2422
Produto P80 (µm)	462	448	469
Número de ciclos	6	9	6
Média da moabilidade (g/rev)	7,34	6,97	8,26
Critério de Parada	Reversão de Tendência	Equilíbrio	Reversão de Tendência
WI (kWh/t)	8,06	8,22	7,69

Analisando-se todos os resultados das amostras compostas pelo Oversize das Peneiras Primária e Secundária (amostras "tal qual", pré-concentrados do jigge alimentado com as amostras "tal qual" e os pré-concentrados do Jigue alimentado com os Blends), observa-se

uma notável constância dos valores de WI, com pequena variação, apresentando uma precisão da metodologia utilizada.

5.4. JIGUE PNEUMÁTICO

Os testes no equipamento jigue resultaram em quatro produtos: concentrado, médio, rejeito e finos conforme explicado na metodologia. Os resultados de cada teste no jigue foram compilados em um pré-concentrado final composto por concentrado mais os médios, e os rejeitos finais apenas o rejeito. Para as amostras “finos” é necessário estudar outras aplicações, uma vez que apresenta teor de ferro considerável e tamanho conveniente para diferentes métodos de concentração.

Observou-se que o produto “médios” não possui alto teor de ferro, porém, apresenta alta recuperação mássica e considerável recuperação metalúrgica do ferro. Este fato aumenta os valores da recuperação mássica e metalúrgica em um pré-concentrado final. Mesmo que o teor de ferro deste produto final seja reduzido, o que não representa um problema nesta etapa do processo, já que esta amostra irá realimentar o moinho AG e, posteriormente, concentrada pelo circuito de espirais.

Os testes de Jigue Pneumático são divididos entre os testes com as amostras de cabeça (Oversize da Peneira Primária e Oversize da Peneira Secundária) e os três *blends* composto por essas duas amostras.

5.4.1. Oversize das Peneiras Primária e Secundária

O Gráfico 6 mostra a granulometria e a Tabela 11 os resultados de densidade dos produtos do teste Jigue realizado com amostra da Peneira Primária. Como esperado, o concentrado possui partículas mais grosseiras e densidade mais alta em comparação com os médios e o rejeito.

A amostra “finos”, o *undersize* do crivo do jigge, tem o mesmo valor de densidade do concentrado, o que pode indicar alto teor de ferro neste produto.

Gráfico 6 Granulometria dos produtos do teste de jigge com o Oversize da Peneira Primária

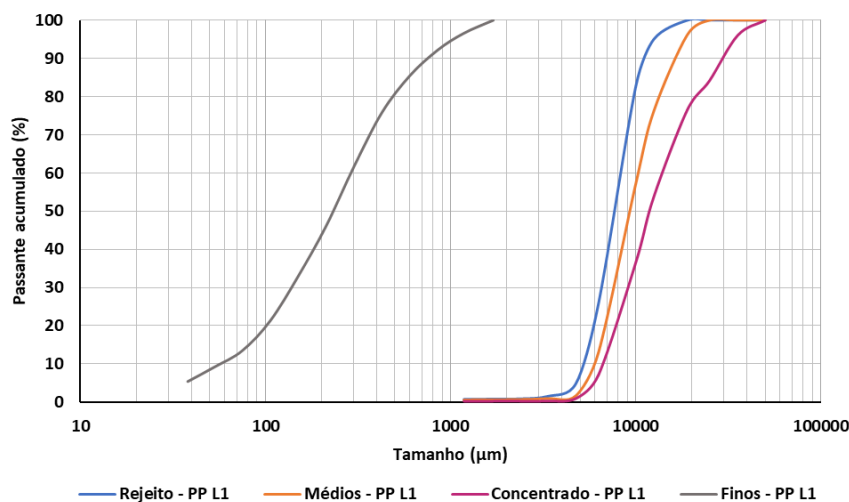


Tabela 11 Densidade dos produtos do jigge PP L1

Amostra	Densidade (g/cm ³)
Alimentação	3,1
Concentrado - PP L1	3,4
Médios - PP L1	2,8
Rejeitos- PP L1	2,8
Finos (< 4 mm) - PP L1	3,4

A Tabela 12 mostra os resultados do teste no jigge com esta amostra. Conforme apresentado nos objetivos, o principal produto são os rejeitos, que serão retirados do circuito. Neste caso, 24,4% da sílica seria retirada do circuito, com perda de ferro de 8,5%. Este processo remove cerca de 20% da massa.

Tabela 12 Resultados teste de Jigge com PP L1

Amostra	Rec. Mássica (%)	Fe Rec. Met. (%)	Distr. SiO ₂ (%)	(%)	(%)
				Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	100,0	100,0	21,2	68,7
Concentrado - PP L1	46,2	67,4	37,1	30,9	55,1
Médios - PP L1	32,0	21,0	36,8	13,9	78,9
Rejeitos- PP L1	19,6	8,5	24,4	9,2	85,5
Finos (< 4 mm) - PP L1	2,2	3,1	1,8	29,2	55,4

A granulometria e os resultados de densidade do teste no jigge com a Peneira Secundária estão no Gráfico 7 e na Tabela 13. Como ocorreu com a Peneira Primária, o

concentrado é o produto mais grosso e os rejeitos têm a densidade mais baixa. O passante no crivo do jigge, neste caso, chamado de undersize, é o mais fino e com a maior densidade.

Gráfico 7 Granulometria dos produtos do teste de jigge com o Oversize da Peneira Secundária

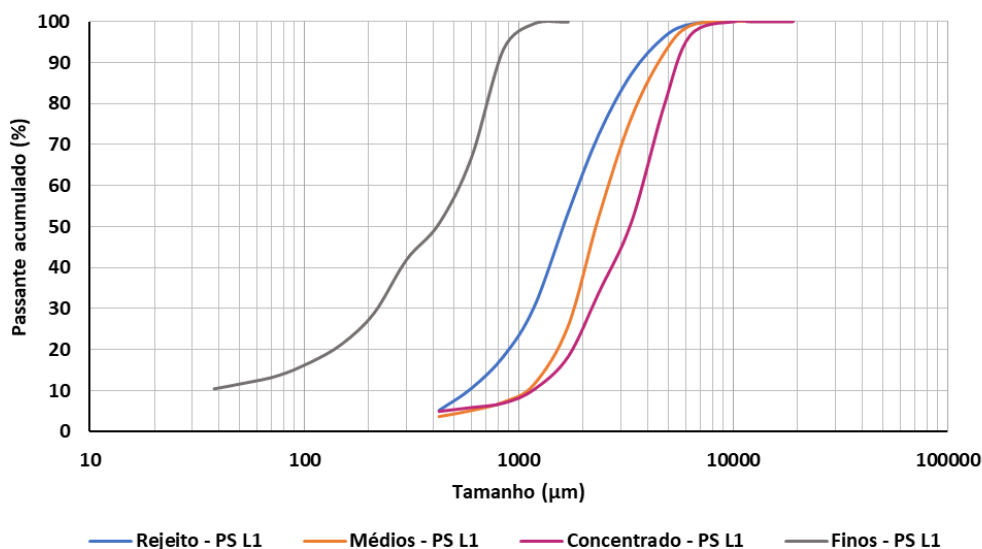


Tabela 13 Densidade dos produtos do jigge PS L1

Amostra	Densidade (g/cm ³)
Alimentação	3,1
Concentrado - PS L1	3,3
Médios - PS L1	2,8
Rejeitos- PS L1	2,8
Finos (< 1 mm) - PS L1	3,9

Todos os resultados estão na Tabela 14. Observa-se que o rejeito tem menos de 7% de teor de ferro, com 14% da massa e menos de 5% de perda de ferro. Em termos de sílica, 18% foi descartada nos rejeitos com 88% de teor.

Tabela 14 Resultados teste de Jigge com PS L1

Amostra	Rec. Mássica (%)	Fe Rec. Met. (%)	Distr. SiO ₂ (%)	(%)	(%)
				Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	100,0	100,0	21,2	68,68
Concentrado - PS L1	49,7	75,2	39,0	31,46	54,10
Médios - PS L1	33,5	14,3	41,9	8,86	86,10
Rejeitos- PS L1	14,0	4,6	17,9	6,79	88,10
Finos (< 1 mm) - PS L1	2,7	5,9	1,3	45,25	32,90

Nos Gráfico 8 e Gráfico 9 estão as comparações dos resultados dos testes de jigge das peneiras primária e secundária. Ambas as amostras apresentaram um pré-concentrado final

semelhante (blend do concentrado + médios), com recuperação mássica de cerca de 80%, teor médio de ferro de 23% e recuperação metalúrgica próxima a 89%.

Sobre os rejeitos, a perda de massa é em torno de 20% para PP com teor de ferro de 9,2% e para a PS, 14% de perda mássica, com teor de ferro de 6,8%. Observou-se maior perda de ferro para a amostra da peneira primária, 8,5%, em comparação a da peneira secundária, 4,6%. Sobre a distribuição da sílica na PP é de 24% e na PS, 18%, com teor de 86% e 88%, respectivamente.

Gráfico 8 Comparação dos concentrados finais dos testes de jigue das amostras PP e PS

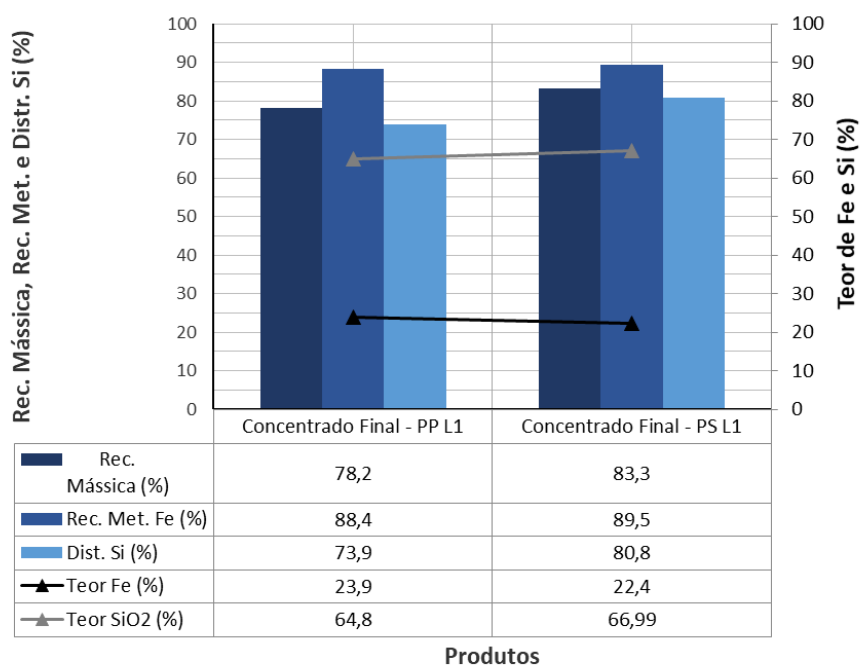
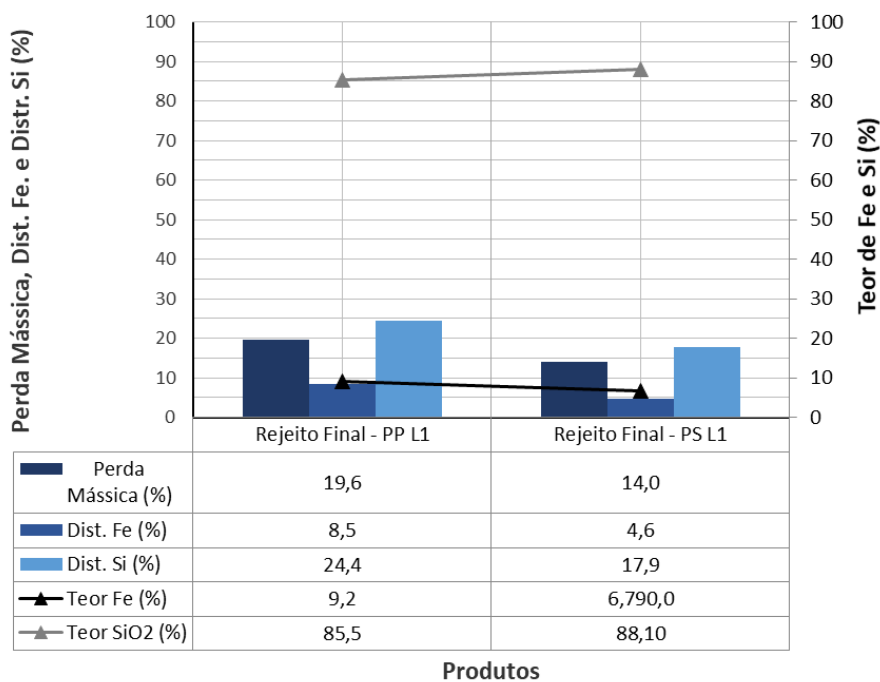


Gráfico 9 Comparação dos rejeitos finais dos testes de jigue das amostras PP e PS



5.4.2. Blends

Os resultados da granulometria e densidade dos produtos do teste de jigue com o Blend 1 (80% PS + 20% PP), estão descritos no Gráfico 10 e Tabela 15. Observa-se curvas mais

espaçadas, indicando maior seletividade nos produtos em termos de tamanhos de partículas com esta amostra.

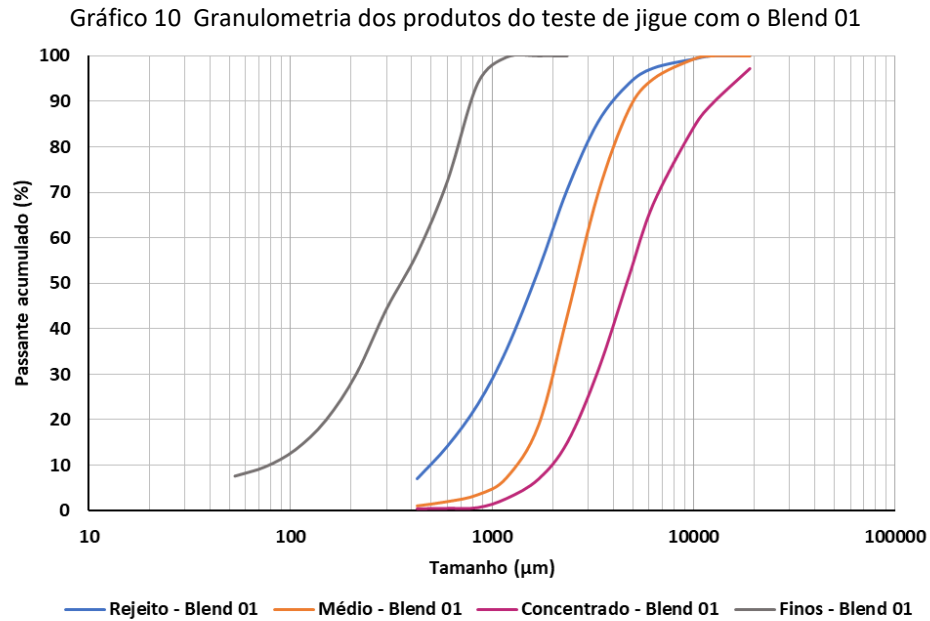


Tabela 15 Densidade dos produtos do jigge com o Blend 01

Amostra	Densidade (g/cm^3)
Alimentação	3,3
Concentrado - Blend 01	3,4
Médios - Blend 01	3,4
Rejeitos- Blend 01	2,8
Finos (< 1 mm) - Blend 01	3,9

A Tabela 16 exhibe os resultados do teste no jigge. O concentrado representa 50% da massa dos produtos, com 27% de teor de ferro e 59,7% de teor de sílica. A perda mássica nos rejeitos é de 14,9%, com perda de ferro em 6% e teor de 7,8%, quanto a distribuição de sílica, tem-se 18% nos rejeitos, com 87% de teor. A amostra “finos”, *undersize* do jigge, tem teor de ferro de 44,9%, com apenas 3,4% de massa.

Tabela 16 Resultados teste de Jigüe com o Blend 01

Amostra	Rec. Mássica (%)	Fe Rec. Met. (%)	Distr. SiO ₂ (%)	(%)	(%)
				Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	100,0	100,0	19,2	71,15
Concentrado - Blend 01	50,0	70,3	41,9	27,07	59,70
Médios - Blend 01	31,7	15,6	38,2	9,46	85,70
Rejeitos- Blend 01	14,9	6,1	18,2	7,88	87,20
Finos (<1 mm) - Blend 01	3,4	8,0	1,6	44,90	33,90

Os resultados do Blend 2, composto por 40% de PP e 60% de PS, são mostrados nos Gráfico 11, Tabela 17 e Tabela 18. Neste caso, observa-se uma densidade semelhante entre os médios, 2,9 g/cm³, e rejeitos, 2,8 g/cm³, o que pode ser explicado pelo menor teor de ferro nessas amostras, 11% e 6%, respectivamente. O concentrado possui teor de ferro de 29,1%, com recuperação metalúrgica de 71% e recuperação mássica de 51,5%.

A perda mássica para os rejeitos é de 13%, com perda de ferro em 3,8% e teor de ferro de 6%, quanto a sílica neste produto, há uma distribuição de 17%, com teor de 90%.

Gráfico 11 Granulometria dos produtos do teste de jigge com o Blend 02

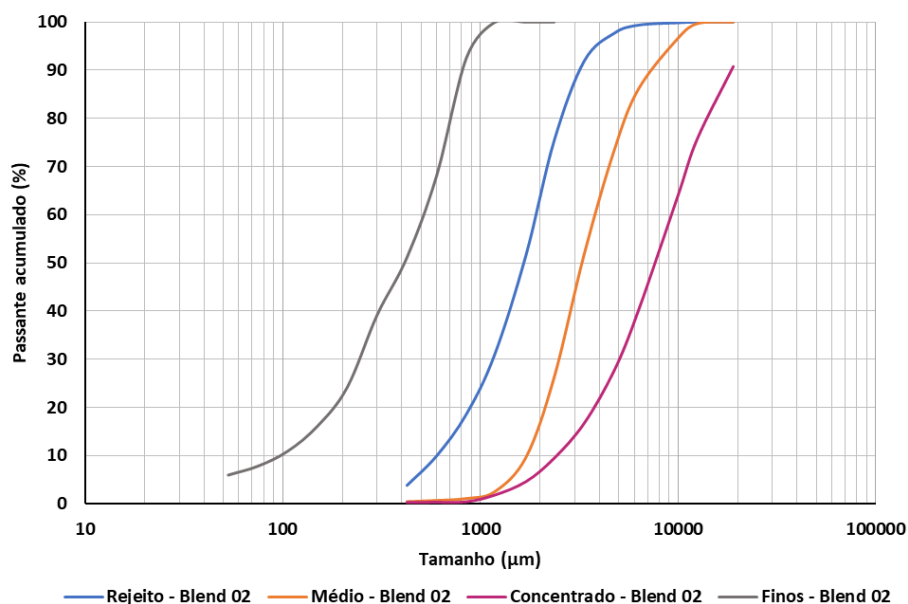


Tabela 17 Densidade dos produtos do jigge com o Blend 02

Amostra	Densidade (g/cm ³)
Alimentação	3,2
Concentrado - Blend 02	3,4
Médios - Blend 02	2,9
Rejeitos - Blend 02	2,8
Finos (< 1 mm) - Blend 02	3,9

Tabela 18 Resultados teste de Jigge com o Blend 02

Amostra	Rec. Mássica (%)	Fe Rec. Met. (%)	Distr. SiO ₂ (%)	(%)	(%)
				Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	100,0	100,0	19,8	70,16
Concentrado - Blend 02	51,5	71,3	43,3	29,14	57,00
Médios - Blend 02	31,3	16,5	37,1	11,10	80,50
Rejeitos - Blend 02	13,1	3,8	17,4	6,05	90,30
Finos (< 1 mm) - Blend 02	4,1	8,5	2,2	43,64	36,10

Para o Blend 3 (20% PS + 80% PP) os resultados são mostrados nos Gráfico 12, Tabela 19 e Tabela 20. Observa-se similaridade entre as curvas da amostra de concentrado e médios, porém, com uma diferença no teor de ferro de 28% e 13%, respectivamente.

A recuperação mássica no concentrado é de 49%, com recuperação metalúrgica de 67%. Sobre os rejeitos, a perda mássica é de 14%, com perda de ferro em 5,7% e 8,4% de teor de ferro. Em termos de sílica, 17,4% são distribuídos para os rejeitos com teor de 87%.

Gráfico 12 Granulometria dos produtos do teste de jigge com o Blend 02

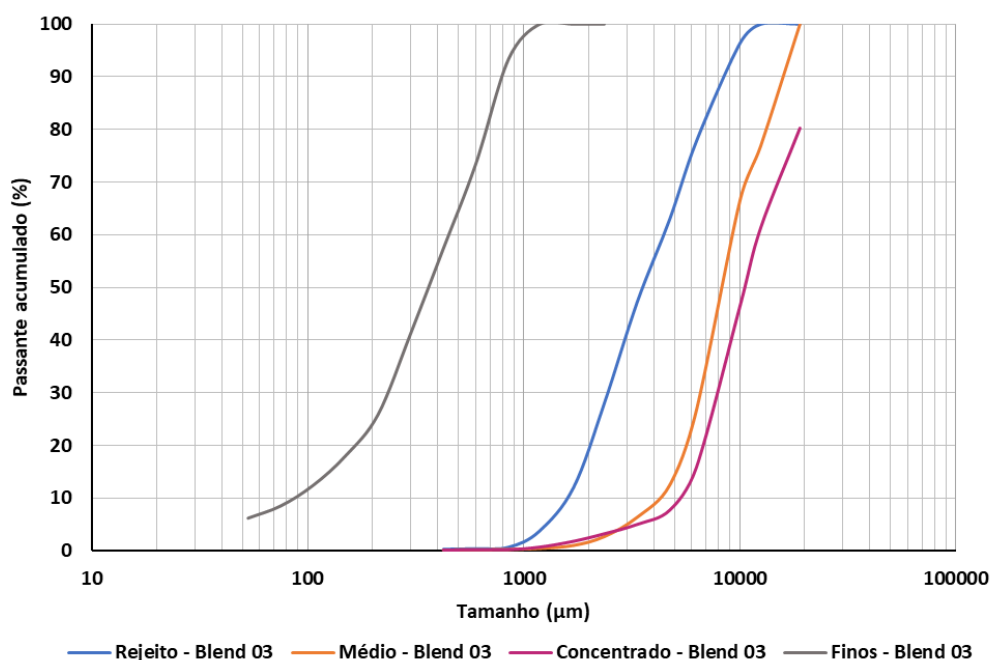


Tabela 19 Densidade dos produtos do jigge com o Blend 03

Amostra	Densidade (g/cm ³)
Alimentação	3,1
Concentrado - Blend 03	3,3
Médios - Blend 03	2,8
Rejeitos- Blend 03	2,8
Finos (< 1 mm) - Blend 03	3,5

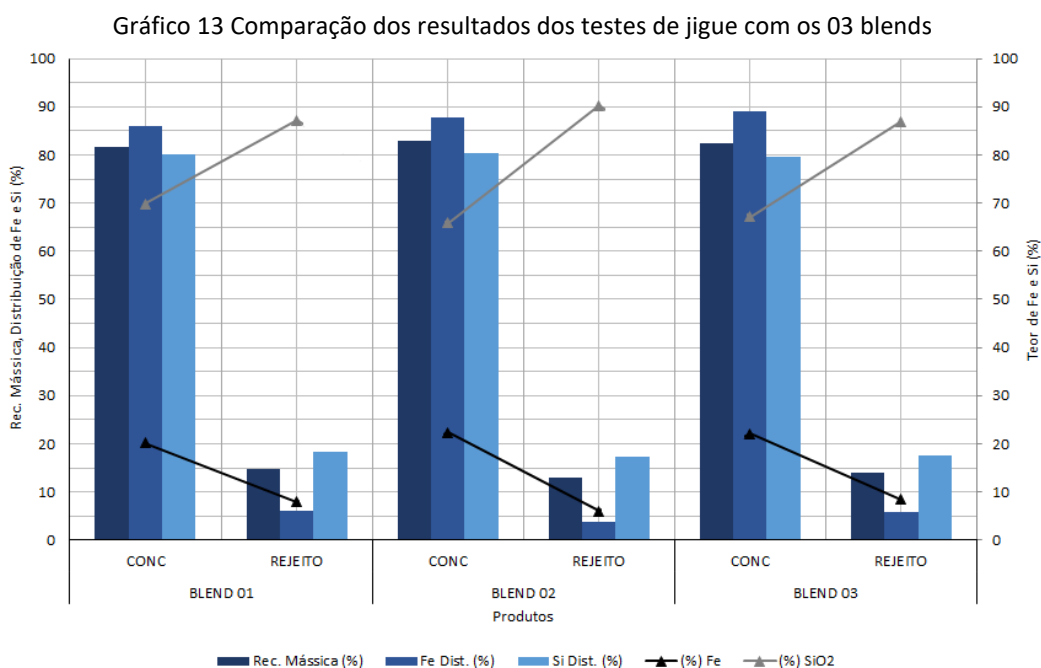
Tabela 20 Resultados teste de Jigge com o Blend 03

Amostra	Rec.	Fe Rec.	Distr.	(%)	(%)
	Mássica (%)	Met. (%)	SiO ₂ (%)	Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	100,0	100,0	20,4	69,50
Concentrado - Blend 03	48,9	67,3	41,2	28,13	58,50
Médios - Blend 03	33,6	21,8	38,5	13,28	79,80
Rejeitos- Blend 03	14,0	5,7	17,4	8,40	86,90
Finos (< 1 mm) - Blend 03	3,6	5,2	2,9	29,66	55,50

Comparando-se todos os pré-concentrados finais para os três *blends* no Gráfico 13, observam-se resultados semelhantes, exceto para a recuperação metalúrgica, na qual se observa uma pequena tendência de alta de 85,9% do Blend 1 para 89% no Blend 3. O teor de ferro médio é de 21,5%, com teor médio de sílica de 67,7% e recuperação mássica de 82%.

Quanto aos rejeitos, também se observa uma similaridade nos resultados da perda mássica, 14% em média. Em termos de teor de ferro e perda de ferro os menores resultados

são observados no Blend 2, 6% e 3,8%, respectivamente. Sobre a sílica, cerca de 18% vai para os rejeitos, com teor médio de 88%.



5.5. TESTE EXPLORATÓRIO MÉDIO DAS ESPIRAIS CLEANERS

5.5.1. Líquido Denso

Os resultados da amostra “tal qual” Médio das Espirais Cleaners são apresentados no Gráfico 14 e na Tabela 21. A partir da granulometria é possível observar a distância entre as curvas, indicando uma alta seletividade deste teste e o potencial de concentração desta amostra por métodos gravíticos. O afundado (concentrado) teve 38% de recuperação mássica, 61% de recuperação metalúrgica e 57,6% de teor de ferro.

Nos rejeitos, produto flotado, a perda mássica corresponde a 62%, com 39% de recuperação metalúrgica e 22,3% de teor de ferro. Em termos de sílica, 87,6% é eliminado nos rejeitos.

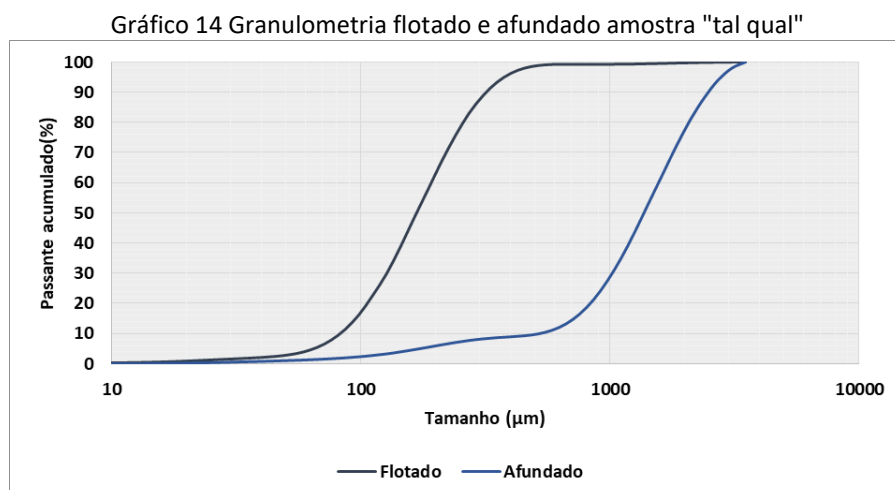


Tabela 21 Resultados teste de Líquido Denso com amostra "tal qual"

Amostra	Rec. Mássica (%)	Rec. Met. Fe (%)	Distr. SiO ₂ (%)	(%)	(%)
				Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	100,0	100,0	35,7	47,21
Concentrado	37,8	61,1	12,4	57,6	15,50
Rejeito	62,2	38,9	87,6	22,3	66,50

Os resultados do segundo teste, amostra “tal qual” com escalpe em >106μm, são mostrados na Gráfico 15 e Tabela 22. O concentrado, produto afundado, apresenta valores de teor de ferro e sílica como o primeiro teste, 60% versus 58% e 11,5% versus 15,5%, respectivamente, mas observa-se uma grande diferença entre os dois testes nos rejeitos, 7% versus 22% de teor de ferro e 88,6% versus 66,5% de teor de sílica.

Quando o teste é analisado na visão da etapa (sem considerar a massa inferior a 106 μm), o concentrado apresenta distribuição de sílica de 9% e recuperação metalúrgica de 86%, 24 pontos percentuais superior ao primeiro teste.

Comparando ambos os testes em termos globais (considerando a massa inferior a 106 μm) estes valores são próximos, para o concentrado 35% de recuperação mássica versus 37%, recuperação metalúrgica de 62% versus 61% e distribuição de sílica 8% versus 12%.

Em termos de rejeitos, o segundo teste pode ser considerado com melhores resultados que o primeiro, mesmo comparando-se os valores globais. Verifica-se uma perda de ferro global de 9% versus 39%, e 7% versus 22% do teor de ferro.

Essa comparação leva a deduzir que os Médios das Espirais Cleaners seriam mais bem aplicados em métodos de concentração do que o no projeto de pré-concentração. Este fluxo

pode ser recirculado em um outro quimicamente semelhante dentro do circuito de espirais. Mesmo que não haja partição granulométrica, a recirculação de toda a faixa granulométrica representa um ganho metalúrgico para o concentrado.

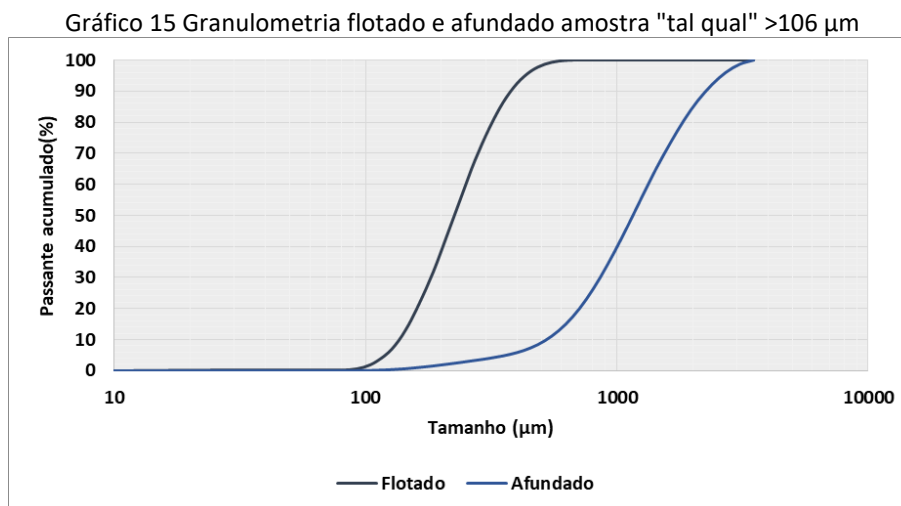


Tabela 22 Resultados teste Líquido Denso com amostra "tal qual" >106 μm

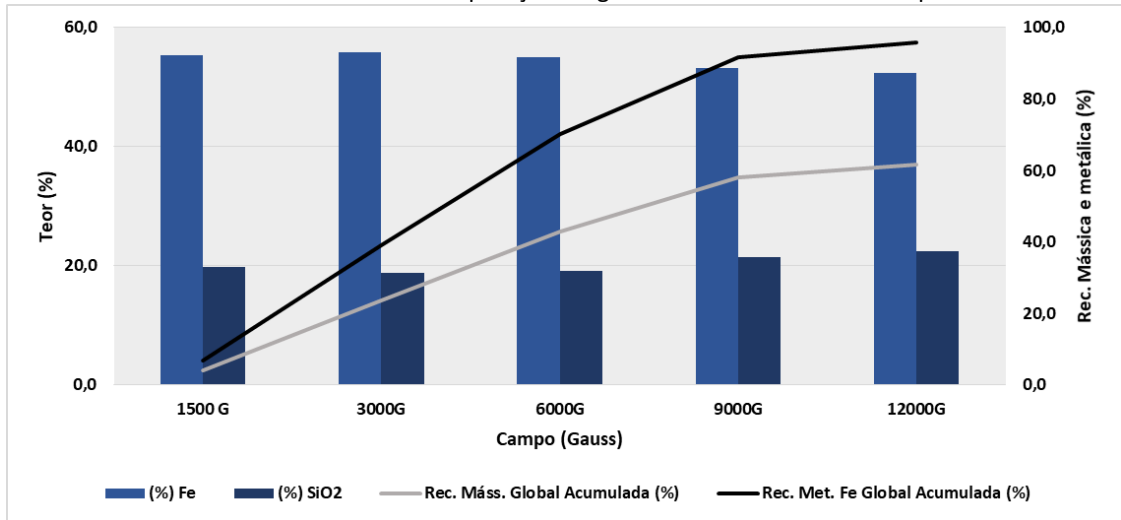
Amostra	Rec. Mássica Etapa (%)	Rec. Mássica Global (%)	Rec. Met. Fe Etapa(%)	Rec. Met. Fe Global (%)	Distr. SiO ₂ Global (%)	Distr. SiO ₂ Global (%)	(%)	(%)
							Fe	SiO ₂
Alimentação	100,0	80,3	100,0	72,1	100,0	88,5	30,2	55,16
Concentrado	43,4	34,8	86,5	62,4	9,1	8,0	60,3	11,55
Rejeito	56,6	45,4	13,5	9,7	90,9	80,5	7,2	88,60
Peneirado < 106 μm	-	19,7	-	27,9	-	11,5	47,6	29,20

5.5.2. Separação Magnética

Os resultados da separação magnética com o Tubo Davis (1500G) e o WHIMS (>1500 G), são mostrados no Gráfico 16. Não há diferença perceptível entre o teor de ferro e o teor de sílica nos concentrados, todos eles variam em torno de 54% para o ferro e 20% para a sílica.

A recuperação mássica global e as recuperações metalúrgicas globais tiveram um crescimento acentuado até os 9000G e um pequeno incremento ao subir para 12000G. Isso poderia representar uma faixa ótima para trabalhar, em que o rendimento e a recuperação de ferro em 9000G são 58% e 92%, e para 12000G é de 61,6% e 95,8%, respectivamente.

Gráfico 16 Resultados dos testes de Separação Magnética com os Médios das Espirais Cleaners



O rejeito final é apresentado na Tabela 23, representando 38% de perda mássica, com pouca perda de ferro, 4,2% de recuperação metalúrgica, o teor de ferro é de 3,7%, a distribuição de sílica de 72% com teor de 92%.

Tabela 23 Rejeito final teste separação magnética

Amostra	Perda Mássica (%)	Perda Fe. (%)	Distr. SiO ₂ (%)	(%)	(%)
				Fe	SiO ₂
Rejeito Final	38,4	4,2	72,0	3,7	92,20

6. CONCLUSÃO

Após todas as análises e testes realizados, é possível concluir que todos os testes de jigge conseguiram eliminar efetivamente uma quantidade considerável de ganga, em torno de 15%.

Falando sobre os concentrados, o teor de ferro teve uma média de 22% para as amostras “tal qual”, que está próximo do teor de ferro de alimentação no circuito da planta de beneficiamento estudada, 21%. Em outros termos, esses concentrados são compatíveis com a alimentação do moinho AG.

Sobre os rejeitos, observou-se maiores resultados com a amostra da Peneira Primária, 20% de perda mássica, com 8,5% de perda de ferro e 25% de distribuição de sílica. As demais amostras, Peneira Secundária e os *blends*, tiveram resultados bastante semelhantes. Uma perda mássica média de 14%, com perda de ferro de 5% e distribuição de sílica de 17,7%. Destaca-se o Blend 02 com a menor perda de ferro, 3,75% e teor de 6%.

Os valores do Work Index dos produtos das amostras Oversize das Peneiras Primária e Secundária (amostra de cabeça, testes de Jigge com a amostra de cabeça e com os *blends*) foram bastante semelhantes, variando de 7 kWh/t a 8 kWh/t. Da amostra Médio das Espirais Cleaners, observou-se o maior valor, 14,92 kWh/t.

Sobre o Médio das Espirais Cleaners foi observado bons resultados no teste de Líquido Denso, o que significa uma recuperação potencial nos métodos de gravíticos e no teste de Separação Magnética, atingindo uma recuperação metalúrgica do ferro de 96% no campo máximo testado, 12000G. O que representa um potencial de concentração dessa amostra além do jigge.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT. Moinho de bolas - Detereminação do Índice de Trabalho. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1990.
- AMBRÓS, W. Jigging: A Review of Fundamentals and Future Directions. Minerals. 2020.
- BAMBER, A S. Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased sustainability of hard rock metal mining. 2008. 331p. Tese (Doutorado) - The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering), University of British Columbia, Vancouver, 2008.
- BARBATO, C.N.; SAMPAIO, J. A.; Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais - Capítulo 10 – Determinação Experimental do Índice de Trabalho (WI) – 5ª Edição, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- BERGERMAN, M. G.; BARBOSA, F. A. M. ; TOMASELLI, B. Y. ; ROVERI, C. ; NAVARRO, F. C. . Pré-concentração de minerais sulfetados de zinco, chumbo e cobre utilizando-se beneficiamento gravimétrico. In: 67 Congresso internacional da ABM, 2012, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: ABM, 2012. v. 1. p. 1082-1092.
- BERGSTROM, B. Crushability and Grindability. SME Mineral Processing Handbook, v.2. 1985.
- CETEM. Determinação experimental do índice de trabalho (WI). Em J. A. Sampaio, S. C. França, & P. F. Braga, TRATAMENTO DE MINÉRIOS: Práticas Laboratoriais (pp. 179-191). Rio de Janeiro: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. 2007.
- CRESWELL, G. M. Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. In: SAIMM cooper, cobalt, nickel and zinc recovery conference, 2001, Joanesburgo: SAIMM, 2001. p. 1-10.
- FERREIRA, K. C.; GALERY, R.; MONTENEGRO, L. C. M.; PERES, A. E. C.; Efeito do escalpe no Work Index de Bond. HOLOS, Ano 31, vol 7. 2015.
- GRIGG, N. J.; DELEMONTEX, G. J. The Pre-Concentration Of Precious And Base Metal Deposits Using The Inline Pressure Jig (IPJ); Higher Feed Grades And More Metal. 2015. Disponível em: < <http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/06/IMPC-2014-Pre-concentration-Paper-Revision-CEEC-150825.pdf>>. Acesso em: 25 Out. 2022.
- HATCH. Mine to Mill Optimisation of Mont Wright. Hatch. 2019.
- Herbst, J. A.; Lo, Y. C. e Flintoff, B. Size liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). Principles of mineral processing. SME, 2003, p.61-118
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; Tratamento de Minérios – 5ª Edição, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- MURPHY, B; VAN ZYL, J; DOMINGO, G. Underground Preconcentration by Ore Sorting and Coarse Gravity Separation. In: NARROW VEIN MINING CONFERENCE, Perth. 2012.
- SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. Beneficiamento Gravimétrico. Editora UFRGS, 2005.
- Smit, F. Coetzee, V. Seymour, M. Notnagel, S. (2012) 'Preconcentration of UG2 Platinum ore: Economic Benefits to Mine, Plant and Smelter'. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Platinum 2012.

TAGUE, C., & MOSHER, J. Conduct And Precision Of Bond Grindability Testing. 2001.

TOMÁZ, R.S; Jigagem: Uma revisão de Literatura. Universidade Federal De Goiás (UFG) Regional Catalão - Especialização Em Tratamento De Minérios. Catalão-GO, 2015.

VALADÃO, G. E.; & ARAUJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte. UFMG, 2012.

WILLS, B. A. Mineral Processing Technology: An Introduction to Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery. Amsterdam: Elsevier. 2006.