

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Determinação de curvas de lavabilidade utilizando análise de imagens
digitais - Estudo de caso: minério de ferro**

Autor: Josué Mesquita de Souza Junior

Orientador: Professor Roberto Galery

Abril / 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Josué Mesquita de Souza Junior

**Determinação de curvas de lavabilidade utilizando análise de imagens
digitais - Estudo de caso: minério de ferro**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor Roberto Galery

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Abril / 2016

Dedico este trabalho, com muito carinho
aos meus queridos pais, Vera e Josué,
à minha irmã Monalisa
e à minha noiva Loren.

“And in the end the love you take is equal to the love you make”

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais que são a base de tudo na minha vida.

A minha noiva Loren por sempre estar ao meu lado me apoiando.

A minha irmã Monalisa por todo o companheirismo.

Ao meu orientador, Roberto Galery, pela oportunidade dada, por todos os ensinamentos e por sempre estar disponível para me aconselhar.

Ao pesquisador Itamar Delbem por toda a contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Luiz Cláudio por todo o conhecimento transmitido durante a graduação e pelas sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

A minha amiga Silvia Martins por toda a ajuda durante o mestrado.

A minha amiga Adriana Cordeiro por todo o incentivo e exemplo.

A Centaurus Brasil mineração pelas informações cedidas.

A todos os meus amigos e professores que não foram citados aqui e que estiveram direta ou indiretamente envolvidos neste trabalho, meu muito obrigado!

RESUMO

A concentração gravítica corresponde a uma das mais antigas e importantes formas de processamento mineral, sendo utilizada para beneficiar uma grande variedade de minérios. Neste contexto, a melhor maneira de investigar e prever resultados de processos gravíticos são as chamadas curvas de lavabilidade. Estas curvas apresentam a distribuição das partículas de um dado material segundo as suas densidades e são construídas a partir de dados experimentais obtidos sob condições ideais nos denominados testes de flutua-afunda. Para a realização destes testes são utilizados líquidos com diferentes densidades, os quais correspondem a substâncias muito tóxicas, voláteis, de difícil manuseio e, na maioria dos casos, muito caras. Além disto, por não existirem líquidos densos com densidades muito elevadas, os mesmos não podem ser usados no fracionamento de sulfetos ou óxidos metálicos, o que restringe o uso das curvas de lavabilidade à materiais leves, como é o caso do carvão. Pensando nisto, procedeu-se ao desenvolvimento do presente trabalho, cujo objetivo foi desenvolver uma nova metodologia para a construção das curvas de lavabilidade a partir da análise de imagens digitais. Com esta metodologia será possível construir curvas de lavabilidade de uma maneira mais rápida e segura, além de tornar possível a aplicação desta ferramenta para minérios que possuam partículas com densidades mais elevadas. Na metodologia proposta, a proporção areal dos minerais que compõe uma determinada amostra é calculada através de análise digital de imagens utilizando-se o software *OptLib*. Conhecendo-se as densidades dos minerais e a proporção de cada um deles nas partículas do material, é possível estimar o comportamento do minério nos testes de flutua-afunda e construir a curva de lavabilidade do mesmo. Para comprovar a aplicabilidade da técnica foi desenvolvido um estudo de caso com amostras de minério de ferro itabirítico provenientes de um teste rougher com uma espiral concentradora. Para tanto, construiu-se a curva de lavabilidade dos produtos gerados neste teste utilizando-se a metodologia proposta e comparou-se os resultados de recuperação mássica estimados por estas curvas com aqueles observados em testes de líquido denso e no estágio cleaner da espiral concentradora. Para o caso do líquido denso, observou-se uma diferença de 7,5 pontos percentuais entre os dados reais e os estimados pelas curvas de lavabilidade. Já no caso da espiral concentradora cleaner, esta diferença caiu para 2,1 pontos percentuais. A diferença encontrada no caso do líquido denso é explicada pelo fato das análises serem feitas considerando faixas granulométricas um pouco diferentes. Já os resultados observados no caso da espiral concentradora cleaner foram satisfatórios, o que indica que a metodologia proposta se adéqua bem a realidade quando os parâmetros originais

são respeitados. Além disto, tentou-se determinar as curvas de teor dos materiais analisados utilizando-se os resultados gerados no software *OptLib*, porém uma comparação com resultados reais determinados em laboratório apresentou diferenças da ordem de 8,3 pontos percentuais, o que mostra que esforços devem ser feitos de modo a aperfeiçoar a técnica. Através do trabalho desenvolvido foi possível concluir que existe um grande potencial para a determinação de curvas de lavabilidade utilizando-se análise digital de imagens, inclusive para minérios com densidades mais elevadas, como é o caso do minério de ferro.

Palavras – chave: Beneficiamento mineral; Separação Gravítica; Curvas de Lavabilidade, Análise de Imagens Digitais.

ABSTRACT

The gravity concentration corresponds to one of the oldest and most important techniques of mineral processing and it is used to process a large variety of ores. In this context, the best way of investigating and predicting results of gravitational processes are called washability curves. These curves show the distribution of particles of a given material according to their densities and they are constructed from experimental data obtained under ideal conditions in so-called float-sink tests. For performing these tests dense liquids with different densities are used, which correspond to very toxic, volatile, unwieldy and, in most cases, very expensive substances. Furthermore, because there are no dense liquids with very high densities, they can not be used in fractionation of sulfides or metal oxides, which restricts the use of washability curves to lightweight materials, such as coal. With this in mind, it proceeded to the development of this work, whose goal was to present a new methodology for the construction of the washability curves from digital image analysis. With this method it will be possible to build washability curves more quickly and safely, making possible the application of this tool for ores having particles with higher densities. In the proposed methodology, the proportion in area of the minerals which comprise a given sample is calculated through digital image analysis using the software OptLib. Knowing the density of the mineral and the proportion of each particle in the material, it is possible to estimate the behavior of the ore in the float-sink tests and build the washability curve thereof. To prove the applicability of the technique a case study was developed with itabiritic iron ore samples from a rougher stage of a spiral separator test. The washability curves of products were built using the proposed methodology and a comparison between the mass recovery results estimated by these curves and those observed in dense liquid testing and cleaner stage of spiral separator was done. In the case of the dense liquid, there was a difference of 7.5 percentage points between real data and the one estimated by washability curves. In the case of cleaner stage of spiral separator, this difference fell to 2.1 percentage points. The difference found in the case of dense liquid is explained by the fact that analyzes are made considering size ranges slightly different. Already the results observed in the case of spiral separator cleaner stage were satisfactory, indicating that the proposed methodology fits well to reality when the original parameters are respected. Furthermore, an attempt was made to determine the material grade curves using the results generated in OptLib software, but a comparison with real results obtained in laboratory showed differences of 8.3 percentage points, which shows that efforts should be made in order to perfect the technique. Through their work developed it was concluded that there is a

great potential for the determination of washability curves using digital image analysis, including ores with high densities, such as iron ore.

Keywords: Mineral Processing, Gravity Separation; Washability Curves; Digital Image Analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Separação gravítica	5
3.2. Testes de flutua-afunda	7
3.3. Curvas de lavabilidade	10
3.4. Análise de imagens digitais	13
3.5. Microscopia	17
3.5.1. Microscopia Ótica de Luz Refletida (MOLR)	17
3.5.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	19
3.5.3. MOLR x MEV	21
3.6. O sistema Opt_{Lib}	24
4. METODOLOGIA	29
4.1. Infra-Estrutura e Recursos Utilizados.....	29
1.1. Informações sobre a amostra utilizada	30
4.2. Testes de espiral concentradora.....	31
4.3. Análise granuloquímica das amostras	33
4.4. Difração de Raios-X	33
4.5. Confecção das seções polidas	33
4.6. Aquisição de imagens no microscópio ótico de luz refletida	35
4.7. Análise de imagens no Opt_{Lib}	36
5. RESULTADOS.....	39
5.1. Espiral concentradora	39
5.2. Difração de Raios-X	42
5.3. Determinação das distribuições de densidade no Opt_{Lib}.....	43
5.3.1. Fração [75-106] μm	43
5.3.2. Fração [106-150] μm	45
5.3.3. Fração [150-212] μm	48
5.3.4. Fração [212-300] μm	50

5.3.5. Fração [300-600] μm	53
5.3.6. Fração [600-840] μm	55
5.3.7. Análise das distribuições de densidade determinadas no Opt _{Lib}	58
5.4. Construção das curvas de lavabilidade.....	61
5.5. Análise curva de teores.....	63
5.6. Teste de Líquido denso.....	66
5.7. Validação do método	68
6. CONCLUSÃO	71
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Resultados de teste flutua-afunda para carvão	8
Tabela 3.2. Características dos principais líquidos densos	9
Tabela 3.3. Escala de Bird.....	12
Tabela 4.1. Infra-estrutura e recursos necessários.	30
Tabela 4.2. Características do equipamento utilizado	32
Tabela 4.3. Parâmetros operacionais utilizados.....	32
Tabela 4.4. Peneiras utilizadas	33
Tabela 5.1. Distribuição em massa dos produtos da espiral concentradora	39
Tabela 5.2. Análise granuloquímica da alimentação da espiral concetradora.....	40
Tabela 5.3. Análise granuloquímica do concentrado da espiral concentradora	40
Tabela 5.4. Análise granuloquímica do rejeito da espiral concentradora	41
Tabela 5.5. Distribuição em massa das frações da espiral concentradora	42
Tabela 5.6. Composição mineral da amostra	43
Tabela 5.7. Resumo das análises de densidade no Opt _{Lib}	58
Tabela 5.8. Comparação entre teores calculados e teores analisados em laboratório	65
Tabela 5.9. Resultados teste de líquido denso	66
Tabela 5.10. Comparação líquido denso x curva de lavabilidade	67
Tabela 5.11. Distribuição em massa estimada dos produtos da espiral cleaner	70
Tabela 5.12. Distribuição em massa dos produtos da espiral cleaner.....	70
Tabela 5.13. Comparação entre resultado real e resultado estimado da etapa cleaner	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Efeito dos mecanismos de concentração gravítica.....	5
Figura 3.2. Esquema do teste afunda-flutua.....	7
Figura 3.3. Curva de lavabilidade.....	11
Figura 3.4. Exemplo do processo de aquisição de imagem digital mostrando a projeção de uma cena em um plano.....	13
Figura 3.5. Etapas de um sistema de processamento de imagens.....	14
Figura 3.6. Componentes de um sistema de processamento de imagens.....	16
Figura 3.7. Esquema de microscópio de luz refletida.....	18
Figura 3.8. Amostras analisadas por MEV (A) e MOLR (B).....	23
Figura 3.9. Aplicação de correção de fundo.....	24
Figura 3.10. Eliminação das partículas que tocam as bordas da imagem.	25
Figura 3.11. (a) imagem original; (b) histograma da imagem original; (c) imagem segmentada; (d) imagem segmentada e individualizada por fase mineral.	25
Figura 3.12. Eliminação de partículas espúrias.	26
Figura 3.13. Técnica de contorno externo de partículas.....	26
Figura 3.14. Análise estatística no OptLib.....	27
Figura 4.1. Fluxograma do teste com a espiral concentradora.....	31
Figura 4.2. Espiral WW6E - Mineral Technologies.....	32
Figura 4.3. Proporção em área dos minerais constituintes das amostras.....	37
Figura 4.4. Distribuição de densidades para carvão mineral.....	38
Figura 5.1. Análise granulométrica dos produtos da espiral concentradora.....	41
Figura 5.2. Distribuição granulométrica dos produtos da espiral concentradora.....	42
Figura 5.3. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [75-106] μm	43
Figura 5.4. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [75-106] μm	44
Figura 5.5. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [75-106] μm	44
Figura 5.6. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [75-106] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados.....	45

Figura 5.7. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [75-106] μm analisada e calculada.....	45
Figura 5.8. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [106-150] μm	46
Figura 5.9. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [106-212] μm	46
Figura 5.10. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [106-150] μm	47
Figura 5.11. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [106-150] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados .	47
Figura 5.12. Correla�o entre distribuições em massa da alimentação da fração [106-150] μm analisada e calculada.....	48
Figura 5.13. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [150-212] μm	48
Figura 5.14. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [150-212] μm	49
Figura 5.15. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [150-212] μm	49
Figura 5.16. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [150-212] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados .	50
Figura 5.17. Correla�o entre distribuições em massa da alimentação da fração [150-212] μm analisada e calculada.....	50
Figura 5.18. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [212-300] μm	51
Figura 5.19. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [212-300] μm	51
Figura 5.20. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [212-300] μm	52
Figura 5.21. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [212-300] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados .	52
Figura 5.22. Correla�o entre distribuições em massa da alimentação da fração [212-300] μm analisada e calculada.....	53
Figura 5.23. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [300-600] μm	53

Figura 5.24. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [300-600] μm	54
Figura 5.25. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [300-600] μm	54
Figura 5.26. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração 300 μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados.....	55
Figura 5.27. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [300-600] μm analisada e calculada.....	55
Figura 5.28. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [600-840] μm	56
Figura 5.29. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [600-840] μm	56
Figura 5.30. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [600-840] μm	57
Figura 5.31. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [600-840] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados .	57
Figura 5.32. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [600-840] μm analisada e calculada.....	58
Figura 5.33. Informações da alimentação da espiral concentradora.....	60
Figura 5.34. Informações do concentrado da espiral concentradora	60
Figura 5.35. Informações do rejeito da espiral concentradora	60
Figura 5.36. Curva de lavabilidade da alimentação da espiral concentradora para a fração [75-840] μm analisada.....	61
Figura 5.37. Comparação entre curvas de lavabilidade analisada e calculada.....	62
Figura 5.38. Curva de lavabilidade do concentrado da espiral concentradora.....	63
Figura 5.39. Curva de lavabilidade do rejeito da espiral concentradora.....	63
Figura 5.40. Relação densidade x teor de Fe.....	64
Figura 5.41. Curva de lavabilidade da alimentação da espiral para a fração	67
Figura 5.42. Fluxograma da segunda fase de concentração com a espiral concentradora.....	68
Figura 5.43. Determinação da densidade de corte da espiral WW6E.....	69
Figura 5.44. Curva de lavabilidade do concentrado da espiral rougher.....	69

1. INTRODUÇÃO

A concentração gravítica pode ser definida como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força da gravidade atuando em conjunto com outras forças (DA LUZ *et al*, 2010).

Esta é uma das mais antigas formas de processamento mineral, sendo utilizada para beneficiar uma grande variedade de minérios, variando desde metais pesados como o ouro até materiais leves como o carvão. Para tanto, é essencial que exista uma considerável diferença de densidade entre os materiais a serem separados de modo a obter uma separação eficiente (WILLS, 1997).

Desta forma, a melhor maneira de investigar e prever resultados teóricos de beneficiamento utilizando-se métodos gravíticos é a chamada curva de lavabilidade. Esta curva apresenta a distribuição das partículas de um dado material de acordo com as suas densidades, sendo construída a partir de dados experimentais obtidos sob condições ideais nos denominados testes de flutua-afunda (MEYERS e WALTERS, 2001).

Os testes flutua-afunda consistem em passar uma amostra controladamente por uma série de líquidos de densidades crescentes, gerando assim, dois produtos: o de menor densidade, denominado flutuado, e o de maior densidade, denominado afundado. O procedimento é repetido sucessivamente com o produto afundado de cada etapa sendo alimentado no líquido de densidade imediatamente superior. Os produtos resultantes (flutuados em cada líquido e o último produto afundado do líquido de maior densidade) são, então, pesados e preparados para serem analisados quimicamente (WILLS, 1997).

Utilizando os dados obtidos nos testes de flutua-afunda é possível construir as curvas de lavabilidade, que permitem conhecer as quantidades e as qualidades dos diferentes tipos de produtos gerados a partir de uma amostra ensaiada. Se os testes de laboratório forem bem conduzidos, os resultados obtidos serão uma boa indicação do comportamento do

minério nas instalações industriais, o que dará ao engenheiro uma ideia da provável eficiência do processo sob avaliação (DA LUZ *et al*, 2010).

Uma desvantagem da utilização de líquidos densos é que, infelizmente, além de caros são muito tóxicos e, dessa forma, de difícil manuseio. Apresentam também, o inconveniente de não poder ser usados no fracionamento de sulfetos ou óxidos metálicos devido às altas densidades envolvidas (DA LUZ *et al*, 2010). Por este motivo o uso desta importante ferramenta se restringe atualmente ao campo de beneficiamento de carvão.

Sendo o minério de ferro uma das principais matérias-primas utilizadas pela sociedade moderna e um dos materiais com maior tonelagem tratada por métodos gravíticos, é de extrema valia o desenvolvimento de uma metodologia que permita o uso das curvas de lavabilidades para esta commodity (e para outros minérios mais densos também).

Tal fato se justifica pois, a possibilidade de conhecer o comportamento do minério em processos de separação gravítica antes mesmo de executar qualquer teste prático reduziria tanto o tempo necessário para a determinação do melhor método a se utilizar, uma vez que seria possível evitar a realização de trabalhos em equipamentos inadequados, quanto os custos envolvidos no processo, através da otimização da tomada de decisão.

Tendo em vista tais fatos, o desenvolvimento de uma técnica mais simples para a construção de curvas de lavabilidade, principalmente para minérios que possuem partículas de densidades mais elevadas consiste em um grande avanço para a análise de operações de separação gravítica.

Desta forma, o presente trabalho visa estudar o problema apresentado acima e avaliar uma possível solução para o mesmo. Para tanto, pretende-se desenvolver uma técnica que possibilite a construção de curvas de lavabilidade de minérios utilizando a análise de imagens digitais.

Assim sendo, será avaliada uma metodologia que relaciona a proporção em área de minerais presentes em partículas analisadas em uma imagem digital com as densidades das mesmas, o que permitirá prever os resultados dos testes flutua-afunda sem a necessidade de executá-los de fato. Isto facilitará a construção das curvas de lavabilidade para todos os tipos de minério, tornando a análise de processos de separação gravítica muito mais flexível e abrangente.

Para averiguar a funcionalidade da técnica proposta, será realizado um estudo de caso com amostras de minério de ferro provenientes de testes piloto de separação em espiral concentradora, sendo as curvas de lavabilidade destas amostras construídas utilizando-se o software Opt_{Lib}, desenvolvido por pesquisadores da UFMG.

A partir do desenvolvimento do trabalho será possível avaliar a aplicabilidade da análise de imagens digitais para a construção de curvas de lavabilidade, o que pode corresponder a um grande avanço tecnológico para a separação gravítica, principalmente para minérios densos, como é o caso do minério de ferro.

2. OBJETIVOS

Objetivo primário:

- Desenvolver uma metodologia para construção de curvas de lavabilidade de minérios através de análise de imagens digitais utilizando o software Opt_{Lib}.

Objetivos secundários:

- Determinar a curva de lavabilidade das amostras estudadas utilizando o método proposto;
- Analisar criticamente o método proposto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Separação gravítica

As diferenças de densidade entre partículas individuais podem ser exploradas para realizar a separação entre as mesmas e concentrar os componentes de interesse (KING, 2001). Esta diferença é aproveitada nos métodos de separação gravítica através da ação da força da gravidade atuando em conjunto com outras forças, como por exemplo, a resistência ao movimento oferecida por um fluido como a água ou o ar (WILLS, 1997).

Os principais mecanismos encontrados nos processos de concentração gravítica são apresentados abaixo e ilustrados na Figura 3.1 (DA LUZ *et al*, 2010).

- Aceleração diferencial;
- Sedimentação retardada;
- Velocidade diferencial em escoamento laminar;
- Consolidação intersticial;
- Ação de forças cisalhantes;

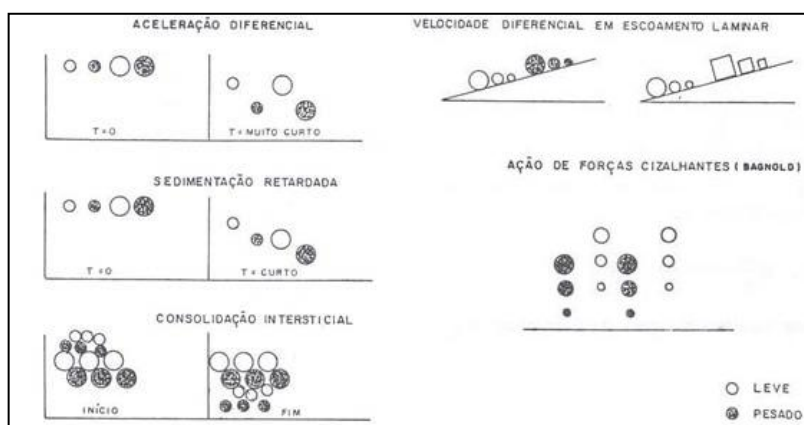


Figura 3.1 Efeito dos mecanismos de concentração gravítica

Fonte: DA LUZ *et al*, 2010

É importante salientar que partículas pequenas respondem mal aos processos de separação gravítica devido à maior influência de suas características de superfície e do arraste da água em comparação às suas densidades, o que limita o método ao tratamento

de partículas mais grosseiras. Na prática, um controle rigoroso da granulometria da alimentação de processos gravíticos é necessário para reduzir o "efeito do tamanho das partículas" e garantir que a separação ocorra eficientemente (WILLS, 1997).

De acordo com Chaves e Filho (2013), os processos de concentração gravítica são os mais utilizados na mineração em termos de tonelagem processada e, em princípio, os mais baratos no que diz respeito aos investimentos de instalação e custo operacional. Isto posto, é importante mencionar que dois grandes fatores limitantes desta técnica correspondem à necessidade de um considerável grau de liberação nas frações a serem beneficiadas e ao elevado consumo de água demandado, o que exige o desenvolvimento de um projeto eficiente para sua recirculação.

Apesar de serem simples e baratos, os métodos gravimétricos perderam espaço na primeira metade do século 20 devido ao desenvolvimento da flotação, que permitiu o tratamento seletivo de minérios complexos de baixo teor. Entretanto, continuam sendo os principais métodos de concentração utilizados tanto para minérios de ferro, quanto para tungstênio, sendo largamente empregados, também, nas indústrias de carvão e estanho (WILLS, 1997).

No cenário brasileiro atual, o carvão é a commodity que possui a maior tonelagem tratada por métodos gravíticos, razão pela qual a maioria das contribuições técnicas nesta área foi desenvolvida por esta indústria (CHAVES e FILHO, 2013).

Devido a este fato, a visão generalizada é de que a separação gravítica é aplicável apenas ao carvão e a algumas separações obscuras em que a flotação falhou (MILLS, 1978). Segundo Chaves e Filho (2013), essa visão é distorcida e ficará cada vez mais ultrapassada, sendo três as razões principais para isto:

- Capex por tonelada mais barato;
- Inexistência de produtos químicos;
- Pequeno impacto ambiental (exceto pelo elevado consumo de água).

Desta forma, nos casos aplicáveis, a separação gravítica pode representar enormes vantagens para o processo de beneficiamento de diversos tipos de minérios. Neste contexto, conforme citado anteriormente, a melhor maneira de investigar e prever resultados teóricos de beneficiamento utilizando métodos gravíticos é a curva de lavabilidade, obtida através dos ensaios de flutua-afunda, apresentados a seguir.

3.2. Testes de flutua-afunda

Nos testes de flutua-afunda uma determinada quantidade de minério em uma faixa de tamanho específica é introduzida em um líquido denso de densidade previamente selecionada, sendo a fração flutuada (densidade menor do que a do líquido) separada da fração afundada (densidade maior do que a do líquido). O procedimento é repetido sucessivamente utilizando-se o material afundado e líquidos de diferentes densidades, conforme apresentado na Figura 3.2 (CHAVES e FILHO, 2013).

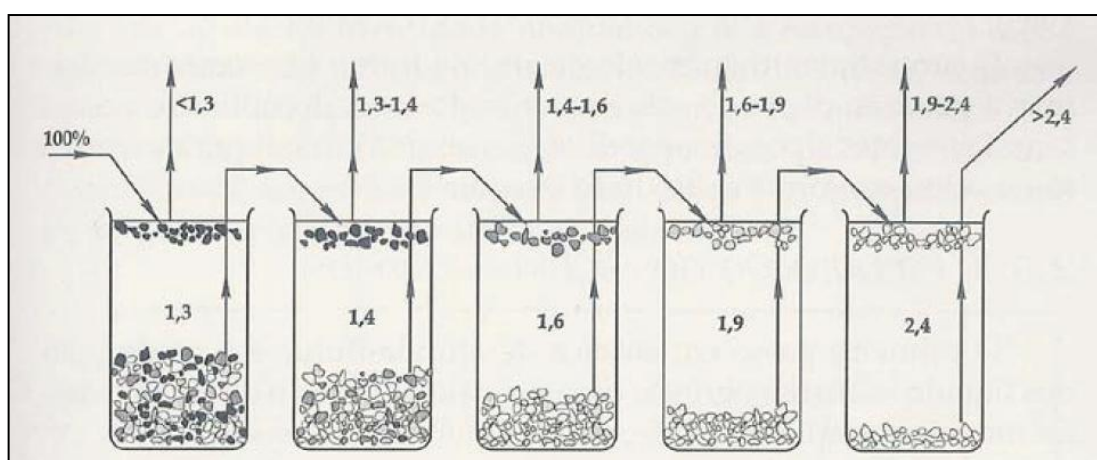


Figura 3.2. Esquema do teste afunda-flutua

Fonte: DA LUZ et al, 2010

Finalizado o teste, os produtos obtidos são lavados cuidadosamente com solventes para remoção do líquido denso. Posteriormente, as amostras são secas, pesadas e analisadas quimicamente, sendo os resultados organizados conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Resultados de teste flutua-afunda para carvão
(adaptado de Wills, 1997)

Faixa de densidade (g/cm ³)	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas	Densidade de separação (g/cm ³)	Flotado acumulado			Afundado acumulado		
					Massa (%)	Cinzas	Teor de cinzas (%)	Massa (%)	Cinzas	Teor de cinzas (%)
-1,30	0,77	4,4	0,03	1,30	0,77	0,03	4,4	99,23	2.213,77	22,3
1,30-1,32	0,73	5,6	4,09	1,32	1,50	4,12	5,0	98,50	2.209,68	22,4
1,32-1,34	1,26	6,5	8,19	1,34	2,76	12,31	5,7	97,24	2.201,49	22,6
1,34-1,36	4,01	7,2	28,87	1,36	6,77	41,18	6,6	93,23	2.172,62	23,3
1,36-1,38	8,92	9,2	82,06	1,38	15,69	123,25	8,1	84,31	2.090,55	24,8
1,38-1,40	10,33	11	113,63	1,40	26,02	236,88	9,2	73,98	1.976,92	26,7
1,40-1,42	9,28	12,1	112,29	1,42	35,30	349,17	10,0	64,70	1.864,63	28,8
1,42-1,44	9,00	14,1	126,90	1,44	44,30	476,07	10,8	55,70	1.737,73	31,2
1,44-1,46	8,58	16	137,28	1,46	52,88	613,35	11,7	47,12	1.600,45	34,0
1,46-1,48	7,79	17,9	139,44	1,48	60,67	752,79	12,5	39,33	1.461,01	37,1
1,48-1,50	6,42	21,5	138,03	1,50	67,09	890,82	13,3	32,91	1.322,98	40,2
+1,50	32,91	40,2	1.322,98	-	100,00	2.213,80	22,2	0,00	0,00	0,0
Total	100	22,2	2.213,80	-	-	-	-	-	-	-

Este tipo de tabela fornece todos os dados obtidos a partir de um teste de flutua-afunda e suas informações podem ser utilizadas para construir as curvas de lavabilidade do minério ensaiado (CHAVES e FILHO, 2013).

É válido salientar que, apesar do exemplo dado anteriormente considerar os resultados de um teste de flutua-afunda de uma amostra de carvão (que corresponde ao mineral com o maior número de informações na literatura), ele é válido para qualquer substância mineral.

No ensaio de flutua-afunda, teoricamente não importa a granulometria das frações e por isto não seria necessário separar partículas de tamanhos diferentes. A realidade, porém, é diferente e, por razões operacionais, os ensaios são realizados em separado para frações específicas (CHAVES e FILHO, 2013).

De acordo com Chaves e Filho (2013), é importante frisar que, como regra geral, nunca se constrói a curva de lavabilidade para materiais finos (<75µm). Isto ocorre porque

partículas finas não respondem bem à separação gravítica, de modo que essa informação seria de nenhuma valia. Além disto, as lamas são extremamente nocivas para os processos densitários, pois por terem dimensões desprezíveis ficam em suspensão homogênea no líquido de separação, distribuindo-se aleatoriamente e contaminando os produtos. Ademais, alteraram a viscosidade do meio, prejudicando a separação das partículas mais grosseiras.

O principal problema dos testes de flutua-afunda está relacionado ao uso dos líquidos densos, substâncias estas, tóxicas, corrosivas e caras, que possuem elevado poder de volatilização e não são recicláveis (CHAVES e FILHO, 2013). Ademais, o teste é bastante oneroso e demanda um controle cuidadoso em sua execução. Os líquidos densos mais utilizados e suas principais características são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Características dos principais líquidos densos

Líquido	Composição	Densidade (g/cm ³)
Tricloroetano	CCl ₃ CH ₃	1,330
Triclorobrometano	CCl ₃ Br	2,001
Bromofórmio	CHBr ₃	2,860
Brometo de metinelo	CH ₂ Br ₂	2,484
Tribromofluormetano	CBr ₃ F	2,748
Tetrabromoetano	CHBr ₂ CHBr ₂	2,964
Di-iodeto de metileno	CH ₂ I ₂	3,325
Licor de Clérici	CH ₂ (COOTI) ₂ .HCOOTI	4,280

Fonte: CHAVES e FILHO, 2013

Outras densidades são obtidas mediante a utilização de um solvente adequado, como o tetracloreto de carbono (densidade 1,500g/cm³), acetona (densidade 0,788g/cm³), benzeno (densidade 0,879g/cm³) e álcool etílico (densidade 0,890g/cm³). Depois de utilizadas, as misturas são destiladas para recuperar o líquido denso (CHAVES e FILHO, 2013).

Como é possível observar, para separação de materiais com densidades mais elevadas, a única opção existente é o líquido de Clérici. A solução de Clérici é extremamente venenosa ao contato e por ser rapidamente absorvida pela pele, pode causar dano ao

sistema nervoso, rins, sistema digestivo e circulatório. Por isto, ao manusear o reagente, recomenda-se o uso de máscara de gás para evitar a inalação de seus vapores, além de roupas protetoras, óculos de proteção e luvas para evitar contatos com a pele (CHAVES e FILHO, 2013).

Tal fato limita a realização dos testes de flutua-afunda a materiais de densidades baixas como o carvão, o que impede a utilização desta valiosa ferramenta para uma vasta gama de minérios.

3.3. Curvas de lavabilidade

A representação gráfica dos resultados obtidos nos testes de flutua-afunda é feita num diagrama cartesiano chamado de curva de lavabilidade que apresenta a massa flutuada (expressa em %) no eixo das ordenadas e a densidade de separação no eixo das abscissas. Por razões práticas, a escala do eixo das massas é invertida, ou seja, cresce de cima para baixo (CHAVES e FILHO, 2013).

Em conjunto com as curvas de lavabilidade são apresentadas também as curvas de teores, onde é apresentado o teor do flutuado em função da densidade de separação. Ambas as escalas crescem no mesmo sentido, mas a convenção é colocar a escala dos teores no lado direito do diagrama (CHAVES e FILHO, 2013).

A forma usual de apresentação dos resultados dos testes de flutua-afunda é construir um diagrama único superpondo as curvas de lavabilidade e de teores, conforme apresentado na Figura 3.3.

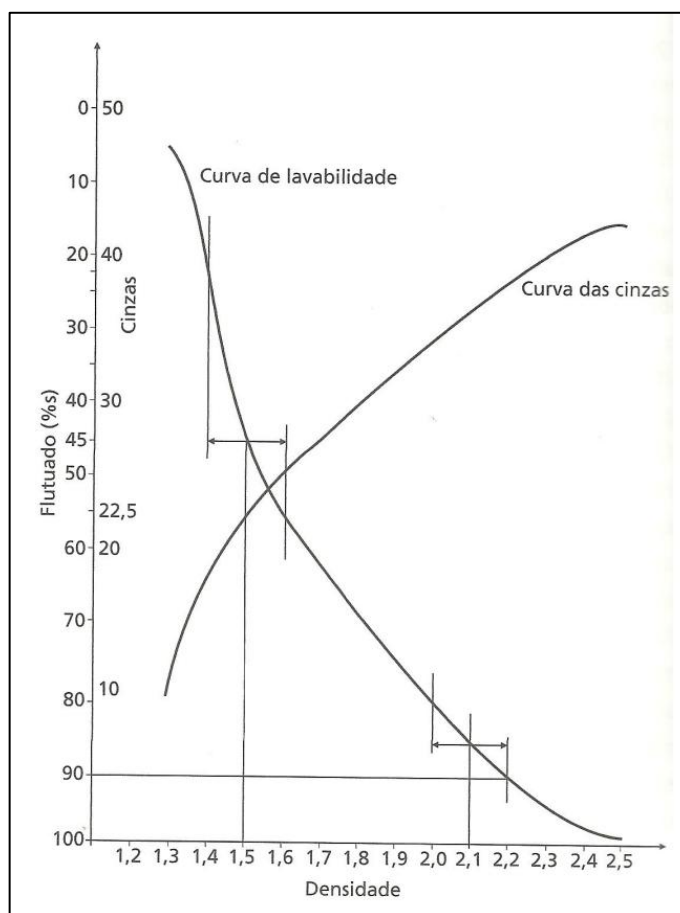


Figura 3.3. Curva de lavabilidade

Fonte: CHAVES e FILHO, 2013

A leitura deste gráfico fornece vários tipos de informações importantes, tais como:

- Massa flutuada teórica para uma dada densidade de separação;
- Densidade necessária para obter teores e massas flutuadas desejadas;
- Quantidade de material "*near gravity*" (porcentagem em massa de material entre o intervalo "densidade de separação +0,1" e "densidade de separação -0,1").

A quantidade de material "*near gravity*" representa a inclinação da curva de lavabilidade na densidade de corte e está associada à dificuldade em beneficiar o minério. Ela é traduzida pela escala de Bird, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Escala de Bird

% near gravity	Problema de separação	Processo recomendado	Tipo
0 a 7	Simple	Qualquer um	Jigues, mesas, espirais, calhas, cones, meio denso
7 a 10	Moderadamente difícil	Processo eficiente	
10 a 15	Difícil	Processo eficiente e boa operação	
15 a 20	Muito difícil	Processo muito eficiente e operação por especialistas	Meio denso
20 a 25	Excessivamente difícil		
Acima de 25	Praticamente impossível	Processo excepcionalmente eficiente, limitado a poucos materiais	Meio denso com controle automático de processo

É importante frisar que a tabela de Bird não leva em conta o tamanho das partículas e, em razão disso, o bom senso e a experiência não podem ser deixados de lado (CHAVES e FILHO, 2013).

As curvas de lavabilidade são amplamente utilizadas para carvões sendo uma ferramenta preciosa na previsão de resultados de beneficiamento deste tipo de material. Como dito anteriormente, o grande problema de utilizá-las para outros minérios reside na dificuldade de encontrar líquidos com densidades adequadas a essas separações (CHAVES e FILHO, 2013).

Para tentar solucionar este problema, pretende-se desenvolver no presente trabalho uma técnica que torne possível determinar a curva de lavabilidade de minérios (independente das densidades de suas partículas) utilizando a análise digital de imagens. Para que o conceito da metodologia proposta fique mais claro, uma breve descrição sobre o tema é feita na sequência.

3.4. Análise de imagens digitais

Segundo Pedrini & Schwartz (2008), o processamento e análise digital de imagens é um conjunto de técnicas aplicado na modificação de imagens digitais, visando obter informações quantitativas a partir das mesmas.

Uma imagem digital é formada por um número finito de elementos chamados pixels, sendo o pixel a menor unidade da imagem digital (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

Pedrini & Schwartz (2008) afirmam ainda que uma imagem digital é um arquivo de computador onde a imagem original foi discretizada em uma matriz ou função $f(x,y)$, onde x e y representam as coordenadas espaciais, e f representa a intensidade do pixel de posição correspondente na imagem real, ou seja, é uma projeção de uma cena em um plano conforme mostrado na Figura 3.4.

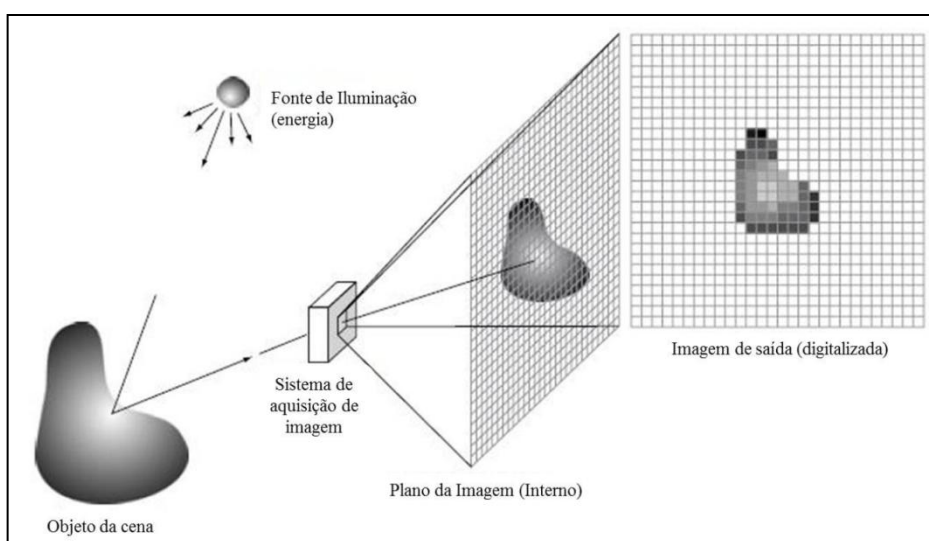


Figura 3.4. Exemplo do processo de aquisição de imagem digital mostrando a projeção de uma cena em um plano.

Fonte: Gonzalez; Woods, 2002, p. 50.

A aplicação da análise de imagens digitais é bastante diversificada abordando as áreas de medicina, geologia, indústria automobilística, siderurgia, mineração, astronomia, geografia, arqueologia entre outras (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

Na mineração, as técnicas de análise de imagem são empregadas desde meados da década de oitenta em aplicações de monitoramento das dimensões do minério conduzido através das correias transportadoras, identificação de pedras preciosas e extração de informações referentes à granulometria, além da inspeção das etapas de britagem, classificação e beneficiamento mineral (OLIVEIRA, 2007).

Um sistema de processamento digital de imagens é constituído por um conjunto de etapas capazes de produzir um resultado a partir do domínio do problema conforme apresentado na Figura 3.5 (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

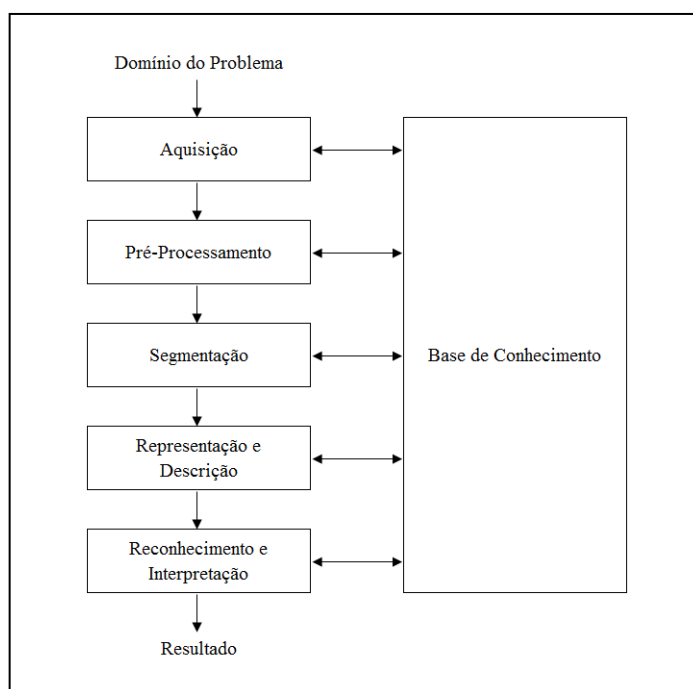


Figura 3.5. Etapas de um sistema de processamento de imagens

Fonte: Adaptado de PEDRINI & SCHWARTZ, 2008

Na etapa de aquisição, dispositivos sensíveis a uma determinada banda do espectro eletromagnético, produzem um sinal elétrico de saída proporcional ao nível de energia detectado. Esse sinal elétrico é convertido em informação digital, tornando possível sua interpretação por meio de computadores (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

A aquisição da imagem é de fundamental importância para o processamento e análise de imagens digitais, pois pode dificultar a aplicação de ferramentas, ou até mesmo inviabilizá-la. Deve-se tomar cuidado para evitar imperfeições, ruídos, não uniformidade na iluminação e inclinação da amostra, pois isto pode dificultar as próximas etapas de análises (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

A etapa de pré-processamento tem como objetivo corrigir erros da etapa de aquisição e prepará-la para a análise da imagem. Nesta etapa a qualidade da imagem é melhorada por meio da aplicação de técnicas de atenuação de ruído, correção de contraste ou brilho e suavização de determinada propriedade da imagem (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

Durante a etapa de segmentação realiza-se a extração e a identificação de áreas de interesse contidas na imagem. Esta etapa é geralmente baseada na detecção de descontinuidades (bordas) ou de similaridades (regiões) (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

Estruturas adequadas de representação devem ser utilizadas para armazenar e manipular os objetos de interesse extraídos da imagem. Neste contexto, o processo de descrição visa à extração de características ou propriedades que possam ser utilizadas na discriminação entre classes de objetos. Estas características são, em geral, descritas por atributos numéricos que formam um vetor de características (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

A última etapa da análise de imagens digitais envolve o reconhecimento e a interpretação dos componentes de uma imagem, sendo necessário adquirir informações quantitativas quanto ao tamanho, forma, posição e textura dos objetos em estudo (DELBEM, 2010).

Em outras palavras, o processo de interpretação consiste em atribuir um significado ao conjunto de objetos reconhecidos, gerando assim, informações que permitam a solução de um dado problema (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

O conhecimento sobre o domínio do problema está codificado em um sistema de processamento de imagens na forma de uma base de conhecimento. A base de conhecimento é dependente da aplicação, cujo tamanho e complexidade podem variar significativamente. A base de conhecimento deve ser utilizada para guiar a comunicação entre os módulos de processamento a fim de executar uma determinada tarefa (PEDRINI & SCHWARTZ, 2008).

Neste sentido, os dispositivos desempenham um papel fundamental em um sistema de processamento de imagens. Esses dispositivos podem ser utilizados para aquisição, armazenamento, processamento, transmissão e exibição de imagens. Componentes de um sistema de processamento de imagens são mostrados na Figura 3.6.

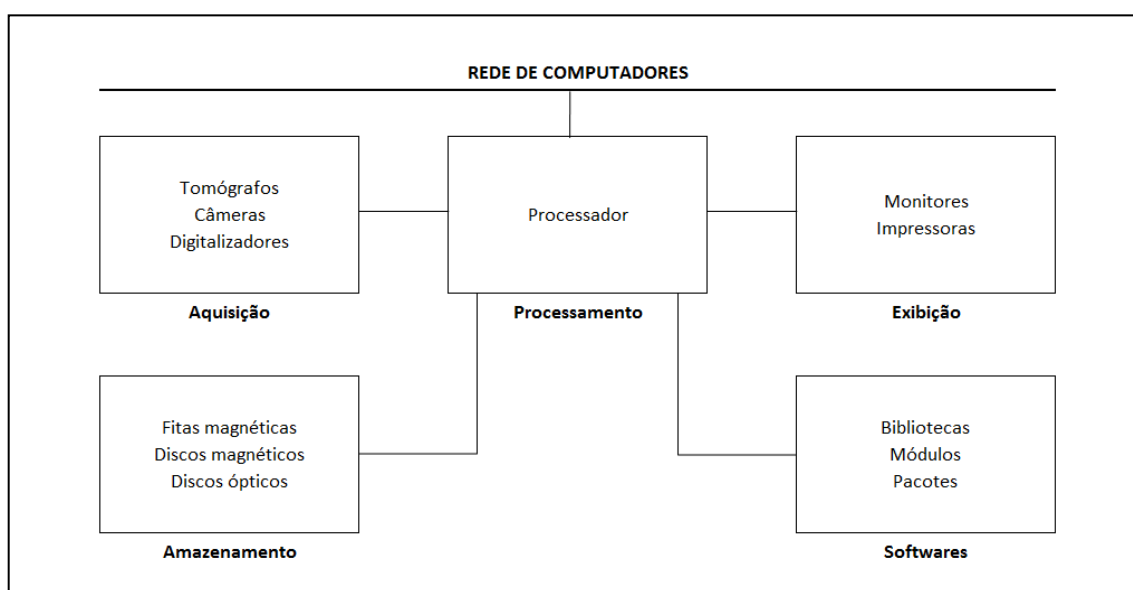


Figura 3.6. Componentes de um sistema de processamento de imagens

Fonte: Adaptado de PEDRINI & SCHWARTZ, 2008

Na mineração, as investigações suportadas por análise de imagens digitais são realizadas, em sua maioria, utilizando-se microscópios óticos (MO) e eletrônicos de varredura (MEV), aplicados em conjunto com câmeras digitais. O item abaixo aborda este tema.

3.5. Microscopia

A curiosidade humana e a busca constante por conhecimento levaram ao desenvolvimento do microscópio, aparelho capaz de aumentar a imagem de pequenos objetos, facilitando assim, o estudo dos mesmos.

Para a caracterização de minérios é de extrema importância a captação de imagens digitais de qualidade de modo a realizar uma boa análise das informações nos softwares dedicados. Tal processo torna-se possível através do uso de equipamentos de aquisição de imagens utilizados em conjunto com microscópios. Na caracterização tecnológica de minérios duas técnicas são amplamente utilizadas, a Microscopia Ótica de Luz Refletida e a Microscopia Eletrônica de Varredura. Ambas as técnicas são abordadas a seguir.

3.5.1. Microscopia Ótica de Luz Refletida (MOLR)

A microscopia ótica de luz refletida é um dos métodos mais tradicionais de identificação de minerais sendo utilizada para análise de minerais opacos. A técnica baseia-se na interação da luz (geralmente luz branca do espectro visível) com os minerais sendo bastante precisa e flexível para análises qualitativas (DA LUZ *et al*, 2010).

É importante salientar que as análises exigem a montagem do material particulado em pastilhas de resinas (geralmente epóxi, acrílica ou poliéster), denominadas secções polidas.

Segundo Goldstein (2016), os primeiros microscópios desenvolvidos para a Biologia e Petrografia utilizavam (e ainda utilizam em determinados casos) uma iluminação por luz transmitida. Nestes casos a luz gerada por uma fonte (comumente lâmpada mais espelho parabólico) é colimada por lentes condensadoras, passando através de aberturas variáveis (chamadas diafragmas) e por filtros, atravessando depois a amostra, que nestes

casos deve ser preparada como uma lâmina fina o suficiente e de faces paralelas para que seja transparente.

Para observação de metais, este esquema não se aplica muito bem, pois os elétrons da camada condutora interagem fortemente com os fótons da luz transmitida, tornando estas amostras pouco transparentes. Por este motivo, foi desenvolvido um microscópio em que a iluminação é feita por meio de luz refletida, seja iluminação oblíqua com sistemas de iluminação independentes do microscópio, ou através de um sistema de iluminação pelo próprio tubo e objetiva do equipamento. Estes equipamentos, denominados microscópios de luz refletida, utilizam sistemas de espelhos, prismas e vidros semi-espelhados que deixam passar a luz em uma direção e refletem na outra, permitindo assim, a análise de materiais não transparentes. A Figura 3.7 mostra o esquema de um microscópio de luz refletida (GOLDSTEIN, 2016).

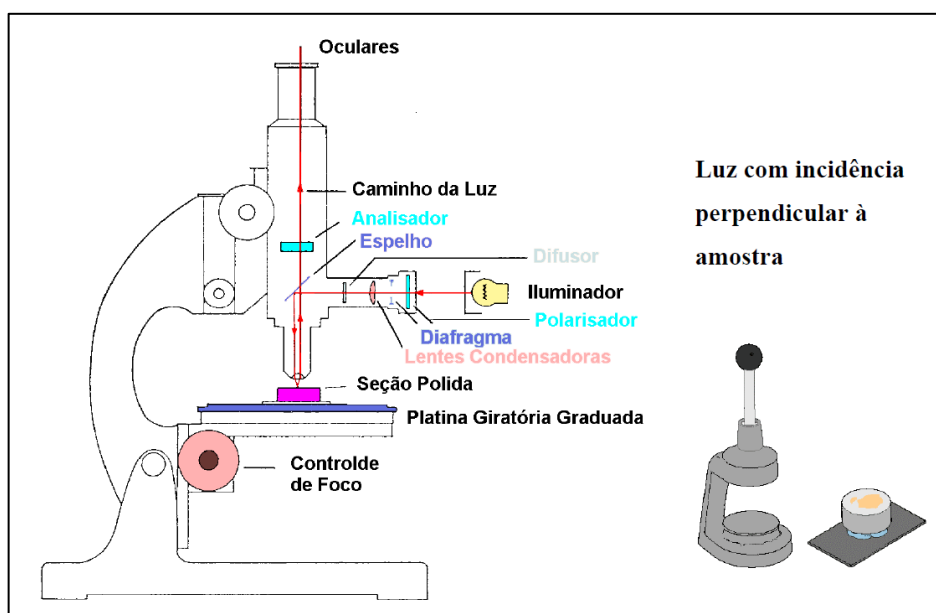


Figura 3.7. Esquema de microscópio de luz refletida

Fonte: Adaptado de GOLDSTEIN, 2016

Utilizando estes equipamentos é possível avaliar características de amostras minerais opacas de tamanho reduzido com um grande nível de detalhes.

3.5.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento essencial na caracterização mineralógica. O funcionamento do MEV consiste na emissão de um feixe de elétron que é direcionado na coluna do aparelho através de duas ou três lentes eletromagnéticas. Essas lentes obrigam o feixe colimado a atingir a superfície da amostra. A interação do feixe de elétrons com a amostra gera uma série de sinais (elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, etc) que podem ser captados e transformados em imagens digitais (DELBEM, 2010).

As imagens geradas pelo MEV se apresentam em tons de cinza proporcionais as intensidades dos sinais gerados na interação do feixe de elétrons com a amostra. Na microscopia eletrônica de varredura, os sinais de maior interesse para a formação de imagens são os elétrons retroespalhados e os elétrons secundários (DELBEM, 2010).

As imagens de elétrons retroespalhados (no inglês *backscattered electrons - BSD*) são aquelas formadas por elétrons do feixe primário, ou seja, do feixe que incide sobre a amostra. Esses elétrons penetram na amostra e ao se chocarem com a eletrosfera dos átomos são defletidos de volta ao vácuo no interior do MEV e detectados por um detector de elétrons retroespalhados. Esse tipo de imagem não permite aumentos muito grandes, no máximo de 5.000 vezes, contudo é muito utilizada em análises no MEV, principalmente na área da tecnologia mineral (DELBEM, 2010).

O que torna a imagem de elétrons retroespalhados interessante é o fato de que o nível de cinza em cada um de seus pontos (píxels) é proporcional a massa atômica média dos pontos correspondentes na amostra real. Quanto maior for a massa atômica média de uma determinada fase mineral, maior será a intensidade desse sinal no detector de elétrons retroespalhados e conseqüentemente mais clara esta se apresentará na imagem digital. Dessa forma, desde que não existam na amostra fases com massas atômicas médias muito próximas, é possível através de técnicas de análise de imagens, separar e quantificar cada fase mineral com base no seu nível de cinza (DELBEM, 2010).

Para identificar quimicamente as fases minerais é necessário um conhecimento prévio da amostra (obtidas através da microscopia ótica e/ou difração e fluorescência de raios-X) e também que o MEV seja equipado com o analisador EDS (acessório acoplado ao MEV que identifica os elementos químicos de cada fase mineral), para análises químicas pontuais. Se o MEV dispõe de EDS, a identificação das fases minerais presentes é imediata pela sua composição química, facilitando muito o trabalho de identificar a mineralogia da amostra e relacionar a mesma aos tons de cinza observados (DELBEM, 2010).

As imagens de elétrons secundários são aquelas formadas por elétrons emitidos pelos átomos da amostra, após interações inelásticas com os elétrons do feixe primário. Nesse tipo de imagem não existe o contraste da massa atômica média das fases minerais existente nas imagens de elétrons retroespalhados. Com isso não existe a possibilidade da aplicação de técnicas de análise de imagens para a separação e quantificação das fases minerais presentes em uma amostra. Essas imagens são indicadas quando se quer ter uma boa visão topográfica da amostra e, provavelmente, a sua maior aplicação na área da tecnologia mineral é avaliar a morfologia dos minerais. Nesse tipo de imagem pode-se conseguir aumentos bem maiores em relação às imagens de elétrons retroespalhados, cerca de 50.000 a 100.000 vezes (DELBEM, 2010).

Na análise ao MEV, a preparação das amostras pode ser feita através de lâminas delgadas polidas (espessura da ordem de 30 μm a 40 μm) ou por seções polidas. Em amostra não condutora elétrica é necessário que estas lâminas sejam recobertas com uma película condutora. Isso é feito para a dissipação da carga elétrica e do calor introduzidos pela exposição ao feixe de elétrons (BRANDÃO, 2007). Essas películas podem ser de dois tipos:

- metálicas (Au, Au-Pd, Al), a chamada metalização, que geralmente favorece muito as imagens do MEV, mas não é ideal para a microanálise;
- película de carbono, com efeito inverso em relação a imagens e microanálise;

Abaixo é feita uma breve comparação entre os dois tipos de microscopia abordados acima.

3.5.3. MOLR x MEV

Tradicionalmente estudos de caracterização tecnológica são realizados utilizando-se sistemas baseados ou em Microscopia Ótica de Luz Refletida ou em Microscopia Eletrônica de Varredura. Cada metodologia possui maior aplicabilidade para casos específicos e a escolha de uma ou de outra depende de vários fatores.

No campo da microscopia ótica de luz refletida (MOLR), podem ser citados alguns trabalhos relevantes desenvolvidos por Pirard (PIRARD, 2004; Pirard et al., 2007). A partir de imagens digitais obtidas por uma câmera digital acoplada a um microscópio ótico, Pirard aplicou a técnica de imageamento multiespectral, utilizando um conjunto de filtros de interferência de banda estreita (10nm), a fim de produzir a separação das fases minerais em um espaço de cores. O método foi posteriormente aperfeiçoado, sendo as imagens obtidas de forma automática por computador (DELBEM, 2014).

No campo da microscopia eletrônica de varredura (MEV), o sistema QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by SCANning electron microscopy) constitui a terceira geração de sistemas de análise mineral automatizado que teve como início, o QEMSEM, desenvolvido por volta de 1985, na Austrália (Goodall et al., 2005). O QEMSCAN analisa o sinal proveniente de um detector BSE e outro proveniente de um espectrômetro por dispersão de energia de raios X (EDS). Ele percorre a imagem mapeando uma série de pontos sobre toda a amostra. O QEMSCAN apresenta como vantagem a boa resolução na identificação dos minerais “claros” possibilitando a identificação de minerais traço de forma mais eficiente (DELBEM, 2014).

Outro sistema desenvolvido no campo da microscopia eletrônica de varredura, o MLA (Mineral Liberation Analyzer) foi apresentado pela primeira vez em 1997 (Gu e Napier-Munn, 1997). Na época, representava a única técnica disponível (Fandrich et al., 2007), a qual utilizava imagens provenientes de um detector de elétrons retroespalhados (BSE)

combinados com a análise química via espectrômetro por dispersão de energia de raios X (EDS). Através do mapeamento automático das amostras dispostas em um porta-amostras, o sistema permitia realizar a caracterização mineralógica quantitativa associada com a determinação da liberação mineral.

Pode ser citado também, o trabalho desenvolvido por Delbem et al. (2010). O sistema denominado LibMin é similar ao MLA com a desvantagem de não apresentar, ainda, o mapeamento químico das amostras via espectrômetro por dispersão de energia de raios-X (EDS). A partir de imagens digitais tomadas de uma seção polida por um detector BSE, o LibMin utiliza técnicas específicas de segmentação para identificar a faixa de intensidades de cinza que representa cada fase mineral. As partículas são individualizadas e classificadas por classes de composição. Dessa forma, a principal função do LibMin é determinar a liberação e a quantificação das fases minerais presentes na amostra.

Tanto os sistemas baseados no MEV quanto os sistemas baseados no MOLR são muito importantes nos trabalhos de caracterização. Nos sistemas baseados em Microscopia Eletrônica de Varredura, a informação composicional é obtida a partir das relações entre o número de elétrons retroespalhados produzidos e o peso atômico médio dos átomos das amostras analisadas, sendo que esta relação fornece o nível de contraste dos pixels da imagem digital obtida (CHESCOE e GOODHEW, 1990). Isto é de extrema valia, pois facilita a diferenciação de materiais distintos em uma imagem digital.

O grande problema é que no caso de minérios de ferro, devido a grande similaridade entre seus pesos atômicos médios, a Hematita e a Magnetita não podem ser identificadas e classificadas como diferentes espécies minerais.

Por outro lado, nos sistemas baseados em Microscopia Ótica de Luz Refletida os óxidos metálicos apresentam contrastes diferentes entre si e podem ser facilmente reconhecidos como diferentes espécies minerais, conforme apresentado na Figura 3.8 (DELBEM *et al.*, 2015).

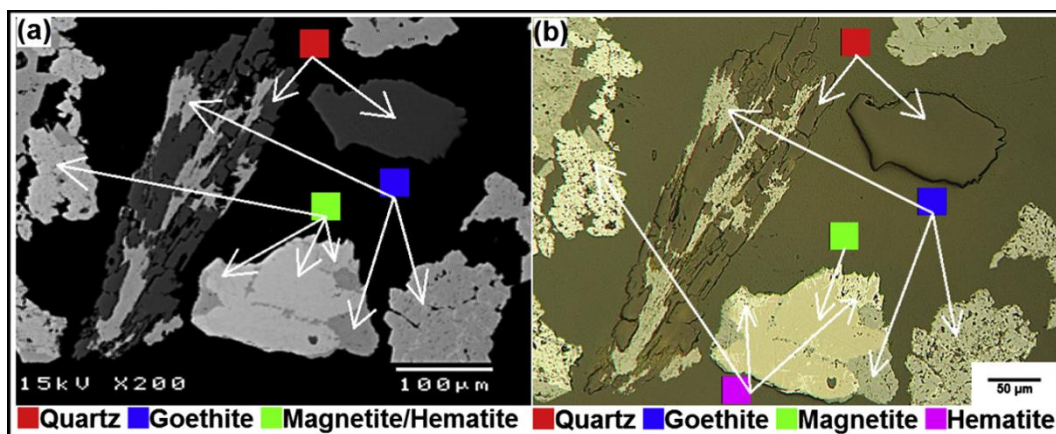


Figura 3.8. Amostras analisadas por MEV (A) e MOLR (B)

Nos sistemas MLOR, problemas são verificados durante a diferenciação entre diferentes fases com similares níveis de refletância, como é o caso do quartzo e da resina epóxi. Ambos os materiais refletem na mesma faixa, o que dificulta a diferenciação dos materiais. É válido salientar que este problema ocorre em todos os sistemas compostos por materiais de refletância similares.

Para os sistemas MOLR, a distinção entre minerais não opacos e a resina epóxi tem sido tema de discussão durante vários anos. Apesar da discriminação entre estes tipos de materiais continuar sendo um fator crítico na análise digital de partículas minerais, grandes avanços foram feitos nos últimos anos, sendo o software Opt_{Lib} uma das ferramentas desenvolvidas no sentido de amenizar o problema discutido acima. Através de técnicas específicas de análise, o software é capaz de diferenciar com boa precisão materiais de refletância próximas e, por isto, foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Um ponto importante a se destacar, é o fato dos custos envolvidos em análises realizadas em sistemas MLOR serem consideravelmente inferiores do que aqueles observados em análises realizadas em sistemas MEV.

É importante salientar ainda, que a princípio, ambas as técnicas podem ser utilizadas para a construção das curvas de lavabilidade de minérios e a escolha entre cada uma delas vai variar de acordo com o sistema analisado e questões externas tais como:

recursos financeiros, equipamentos disponíveis, densidades e refletância dos materiais de interesse, dentre outros.

Dando continuidade ao trabalho, uma breve descrição do funcionamento do software Opt_{Lib} é realizada em seguida.

3.6. O sistema Opt_{Lib}

O Opt_{Lib} utiliza técnicas de processamento e análise digital de imagens para determinar o grau de liberação de minérios. Utilizando imagens digitais de partículas contidas em uma faixa de tamanho específica, o software permite determinar a composição areal de uma população de partículas, classifica-las por classes de composição, avaliar a liberação relativa do mineral de interesse e quantificar as diferentes fases minerais presentes na população de partículas (DELBEM *et al*, 2011).

Quando uma imagem digital é analisada no Opt_{Lib} , ela passa automaticamente por uma correção de fundo realizada a partir da subtração da imagem original por um padrão obtido através da aplicação sucessiva do filtro gaussiano na própria imagem, conforme apresentado na Figura 3.9 (à esquerda, uma imagem original e à direita a mesma imagem após o processo de correção de fundo).

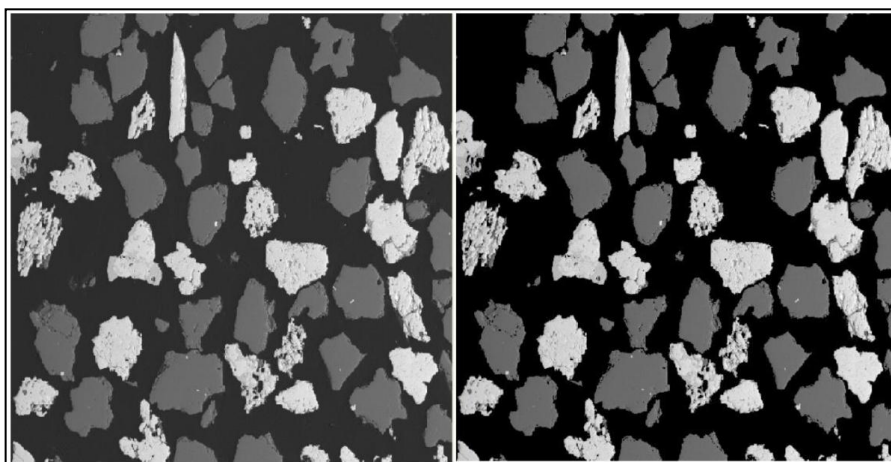


Figura 3.9. Aplicação de correção de fundo.

Após o tratamento acima, as partículas que tocam as bordas da imagem são eliminadas automaticamente pelo software para evitar erros nas medidas a serem realizadas. A Figura 3.10 abaixo apresenta a imagem com o fundo corrigido após passar pelo processo de eliminação de partículas de bordas (DELBEM, 2010).

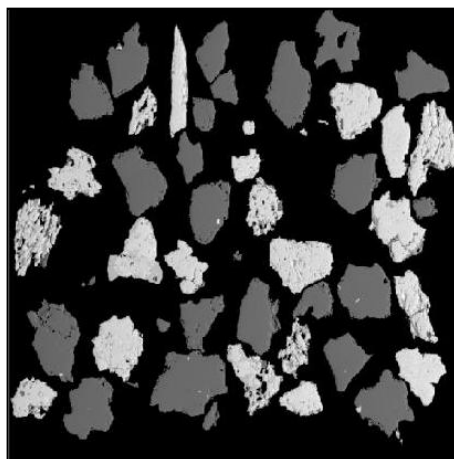


Figura 3.10. Eliminação das partículas que tocam as bordas da imagem.

Para a segmentação das partículas, o OptLib utiliza um algoritmo baseado na limiarização por histograma. Assim sendo, o software analisa automaticamente os picos e vales do histograma de uma determinada imagem e, através desta análise, identifica cada faixa de níveis de cinza calculando um limiar de corte nos vales entre cada pico encontrado. Desta forma, cada faixa de níveis de cinza encontrada recebe uma cor específica que possibilita a sua identificação na imagem analisada conforme mostrado na Figura 3.11 (DELBEM, 2010).

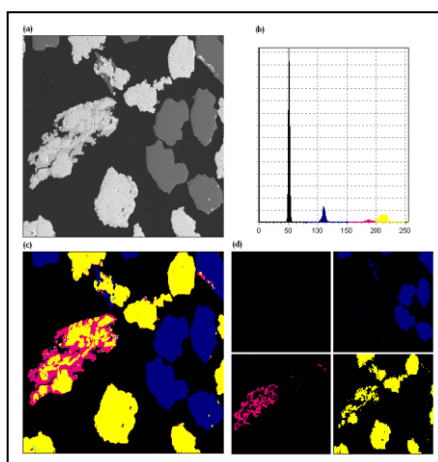


Figura 3.11. (a) imagem original; (b) histograma da imagem original; (c) imagem segmentada; (d) imagem segmentada e individualizada por fase mineral.

Antes da etapa de análise é realizada a eliminação de fragmentos de partículas que não pertencem a faixa granulométrica estudada. Essas partículas devem ser eliminadas, pois podem interferir na precisão dos resultados das análises a serem realizadas. Na imagem da Figura 3.12 pode ser vista à esquerda uma imagem que já passou pelo processo de segmentação e a direita a mesma imagem após serem eliminadas as partículas espúrias.

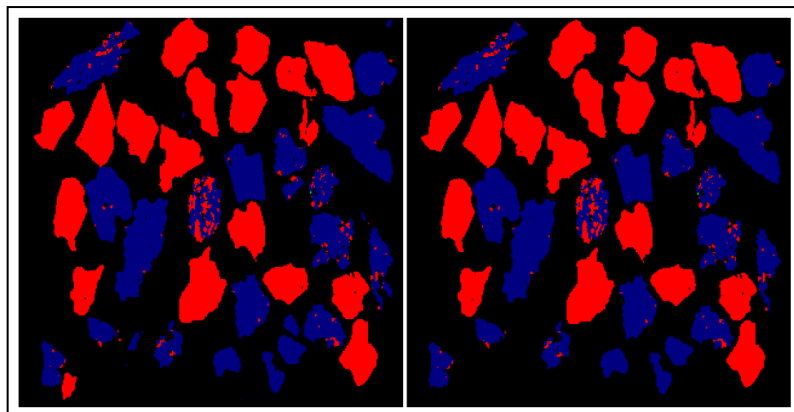


Figura 3.12. Eliminação de partículas espúrias.

O Opt_{Lib} possui um algoritmo que permite analisar individualmente cada partícula presente na amostra. O algoritmo varre a imagem e contorna somente o exterior de cada partícula, guardando o endereço (posição [x,y]) de entrada de cada uma delas. Com essa técnica é possível analisar individualmente a composição de cada partícula presente na imagem. Na Figura 3.13, é possível observar a esquerda a imagem original e à direita a imagem após processamento contendo somente o contorno externo das partículas individuais.

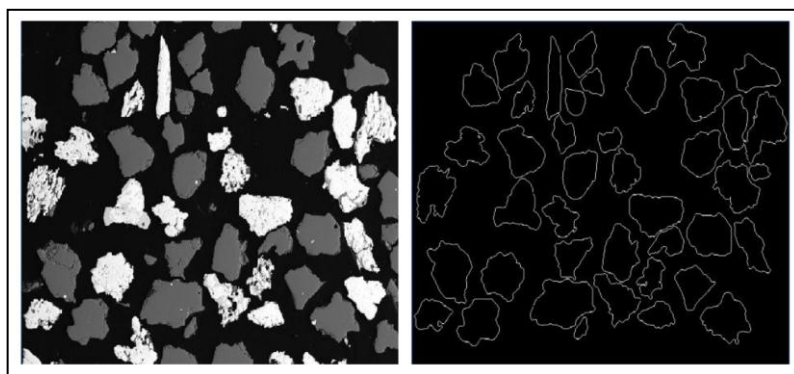


Figura 3.13. Técnica de contorno externo de partículas

Depois de realizado o processamento inicial descrito acima, a imagem está pronta para a avaliação dos parâmetros importantes para a determinação da liberação. Neste procedimento as partículas individuais são identificadas de acordo com a distribuição percentual de pixels que representa a fase (ou fases) de interesse em relação ao número total de pixels da partícula analisada. Posteriormente as partículas podem ser agrupadas em classes distintas em relação aos valores distribuídos. A partir daí, o grau de liberação é calculado utilizando-se o método proposto por Gaudin (GAUDIN, 1958).

O Opt_{Lib} está programado para fornecer o grau de liberação de uma determinada fase de interesse na amostra de minério analisada, sendo os dados calculados a partir das áreas dos pixels. Além disto, o software fornece também a variância referente a cada parâmetro calculado.

Para efeito de precisão, a população de partículas pode ser atualizada a medida que uma nova imagem é acrescentada na avaliação. A variância pode, então, ser reavaliada enquanto informações de outras imagens são incorporadas. Os cálculos cumulativos podem ser realizados até que se consiga a precisão estabelecida conforme apresentado na Figura 3.14.

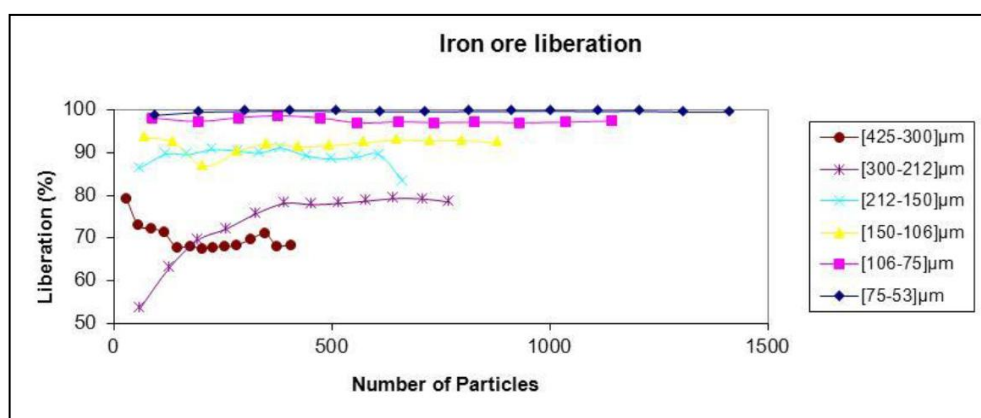


Figura 3.14. Análise estatística no Opt_{Lib}

Nesta imagem é possível observar que a partir de um determinado número de partículas analisadas, o grau de liberação calculado atinge um patamar que indica o grau de liberação real da amostra.

Para maiores informações a respeito do software Opt_{Lib}, sugere-se a leitura de Delbem (2014), onde é feita uma descrição detalhada do funcionamento do software.

O intuito no presente trabalho é utilizar as ferramentas do Opt_{Lib} para calcular a densidade de cada partícula analisada em uma dada amostra e construir a curva de lavabilidade da mesma. A metodologia a ser utilizada para executar tal tarefa é apresentada abaixo.

4. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foi utilizada uma amostra de minério de ferro itabirítico proveniente do depósito de Jambreiro, de propriedade da Centaurus Brasil Mineração, localizado na região de Guanhães, Minas Gerais, Brasil. Este minério foi escolhido por ser constituído essencialmente por quartzo e óxidos de ferro, sem a presença significativa de outros minerais contaminantes, o que facilita a análise das imagens digitais e, conseqüentemente, a determinação das densidades das partículas analisadas.

A amostra em questão foi alimentada em uma espiral concentradora em escala piloto, gerando dois produtos, um concentrado e um rejeito. Amostras dos três produtos referentes ao teste (alimentação, concentrado e rejeito) foram coletadas e analisadas em laboratório (química e fisicamente).

Nestas análises determinou-se a constituição mineral do material através de difração de raios-x e realizou-se a análise granuloquímica do mesmo. Após isto, frações específicas foram separadas para montagem de seções polidas.

Imagens digitais destas seções foram captadas e posteriormente analisadas no software Opt_{Lib}, sendo possível determinar a distribuição de densidades por classe de tamanho nas amostras ensaiadas. De posse das distribuições de densidade e da distribuição granulométrica de cada amostra foi possível construir as curvas de lavabilidade das mesmas. Os resultados encontrados foram analisados e comparados entre si.

4.1. Infra-Estrutura e Recursos Utilizados

Os principais recursos utilizados durante a execução desta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Infra-estrutura e recursos necessários.

Ensaio	Recurso	Fornecedor
Teste piloto em espiral concentradora	Amostra de minério de Ferro Itabirítico	Centaurus do Brasil Mineração
Teste piloto em espiral concentradora	Espiral concentradora modelo WW6E (Mineral Technologies)	Fundação Gorceix
Difração de raios-x	Difratômetro Philips PANalytical EMPYREAN	Dep. Engenharia de Minas UFMG
Análise granulométrica	Peneira vibratória	Dep. Engenharia de Minas UFMG / SGS Geosol
Captação de Imagens	Câmera digital Canon PowerShot S80	Dep. Engenharia de Minas UFMG
Captação de Imagens	Microscópio Leitz/Leica Modelo Orthoplan Pol	Dep. Engenharia de Minas UFMG
Análise por imagem	Software OptLib	Dep. Engenharia de Minas UFMG

1.1. Informações sobre a amostra utilizada

A cerca de 20 km da cidade de Guanhães, Minas Gerais, no terreno gnáissico-granítico do Complexo de Guanhães, embasamento da Faixa Araçuaí, localiza-se o depósito de minério de ferro do Jambreiro que possui uma reserva de aproximadamente 128 Mt.

A formação ferrífera bandada (FFB) ocorre em um enorme dobramento reclinado, na formação média do grupo Guanhães, com plano axial e mergulho para a direção SW. O flanco sudoeste, denominado Corpo Tigre, é o que apresenta maior homogeneidade e continuidade, sendo as amostras aqui estudadas provenientes desta região. O flanco nordeste se apresenta sedimentado, gerando dois corpos menores denominados Cruzeiros e Galo (SILVA *et al*, 2014).

Nas formações ferríferas bandadas ocorrem corpos enriquecidos de anfibólio e dolomita, além de algumas partes xistosas ricas em muscovita. As FFB's são homogêneas apresentando teor médio de ferro de 25% a 35%, além de grãos de granulometria média a grosseira, com bandas milimétricas de hematita e baixas quantidades de magnetita alternada com finas bandas de quartzo.

A porção intemperizada de profundidade de 60 a 80 metros apresenta uma formação ferrífera bandada friável, o que permite uma concentração eficiente, basicamente utilizando-se classificação, separação gravimétrica e separação magnética. A operação de lavra não necessita do uso de explosivos. Além disso, minerais na parte intempérica, como dolomita e actinolita, estão completamente ou parcialmente alterados promovendo a geração de produtos que não são contaminados por cálcio e magnésio (SILVA *et al*, 2014).

Ainda de acordo com Silva *et al* (2014), a reserva lavrável estimada pode chegar a aproximadamente 48,5 Mt, possuindo um teor médio de 28,1% de ferro.

4.2. Testes de espiral concentradora

O teste piloto com a espiral concentradora foi realizado em fevereiro de 2013 nas instalações da Fundação Gorceix, em Ouro Preto/MG conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.1. Previamente a realização do teste, a amostra inicial recebida nas instalações da Fundação Gorceix foi classificada a úmido em uma peneira vibratória com malha igual a 1 mm. O oversize deste peneiramento foi britado em um britador de mandíbulas até 100% <1 mm.

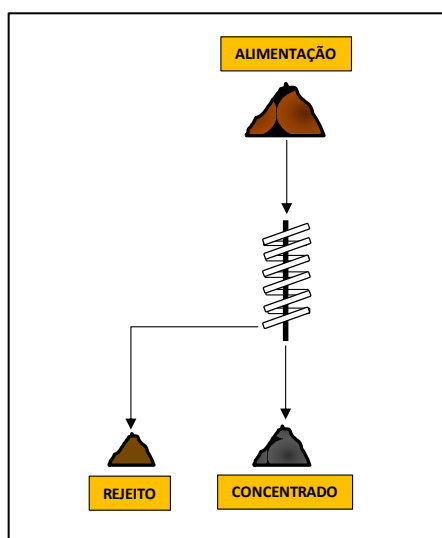


Figura 4.1. Fluxograma do teste com a espiral concentradora

As informações técnicas da espiral concentradora utilizada no teste são apresentadas na Tabela 4.2 e uma foto do equipamento é apresentada na Figura 4.2.

Tabela 4.2. Características do equipamento utilizado

Equipamento	Espiral Concentradora
Modelo	WW6E
Fabricante	Mineral Technologies
Número de Passos	7



Figura 4.2. Espiral WW6E - Mineral Technologies

Os parâmetros operacionais utilizados no teste são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros operacionais utilizados

Parâmetro	Valor
% de sólidos na alimentação	40
Taxa de alimentação (kg/h)	1.073
Água de lavagem (l/h)	999
% de sólidos no concentrado	54
% de sólidos no rejeito	26

4.3. Análise granulométrica das amostras

Foram realizadas análises granulométricas com todos os produtos gerados no teste piloto com espiral concentradora utilizando as peneiras apresentadas na Tabela 4.4. Todas as amostras foram enviadas para o laboratório da SGS Geosol para determinação de seus respectivos teores.

Tabela 4.4. Peneiras utilizadas

Peneira	Abertura (μm)
1	1000
2	850
3	600
4	300
5	212
6	150
7	106
8	75
9	38

4.4. Difração de Raios-X

Uma amostra da alimentação da espiral concentradora foi submetida a análise semi-quantitativa por Difractometria de Raios-X (DRX), realizadas em um Difrátômetro Philips-PANalytical EMPYREAN, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. O método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD – International Centre for Diffraction Data.

4.5. Confeção das seções polidas

As seções polidas foram preparadas misturando-se resina epóxi com o seu respectivo endurecedor, além de um copolímero de alta densidade. Esta substância foi utilizada para aumentar a viscosidade da resina de modo a:

- Reduzir a velocidade de sedimentação das partículas minerais para dar a chance da resina se polimerizar antes que todo o material se deposite no fundo do recipiente (forma). Este procedimento diminui o problema relacionado à orientação preferencial das fases mais densas e, também, diminui a ocorrência de partículas muito próximas umas das outras.
- Evitar ao máximo que os poros presentes em algumas partículas da amostra em estudo sejam preenchidos por resina. Isto facilita o processo de identificação destes poros nas imagens digitais de *MOLR* pelo software *OptLib*.

A seguir, é descrito o padrão de preparo das seções polidas:

- Embutimento das amostras em resina epóxi:

Para a confecção de cada seção (referente a cada classe de tamanho obtida na análise granulométrica), foram utilizados 7g de resina epóxi, 2.1g de catalisador, 1.0g do copolímero de alta densidade e 2g da amostra. O material foi bem misturado para garantir que a resina molhasse toda a superfície das partículas e, também, para que não ocorresse a agregação das mesmas. Em seguida cada preparo foi depositado em formas cilíndricas próprias, com dimensões de 25mm de diâmetro, por 25mm de altura. Uma câmara de vácuo foi utilizada para retirar as bolhas de ar formadas durante a mistura do material e durante o seu depósito nas formas.

- Desbaste e polimento:

Após as seções estarem completamente secas, elas foram desbastadas até que as primeiras camadas de partículas fossem descartadas, diminuindo assim o problema da orientação preferencial das fases mais densas. Lixas de grãos 240, 320, 400, 600 e 800, foram utilizadas no desbaste. Posteriormente essas seções foram polidas com pastas de diamante de 15 μ m, 9 μ m, 6 μ m, 3 μ m, 1 μ m e 0,25 μ m, respectivamente. O polimento e o desbaste foram realizados através de uma politriz semiautomática, marca Buehler,

modelo Minimet 1000, com acessórios e materiais de consumo, pertencentes ao Departamento de Engenharia de Minas da UFMG (DEMIN-UFMG). Ao término de cada etapa de polimento (troca da pasta de diamante) as seções foram submetidas a um banho ultrassônico para a eliminação de resíduos e limpeza geral.

É bom salientar que a etapa de preparação das seções polidas é crítica para se obter imagens de qualidade no *MOLR* e consequentemente resultados precisos de densidade pela metodologia proposta neste trabalho.

É importante salientar que optou-se por não construir-se seções polidas para as frações menores do que 75 μm , pois como dito anteriormente, materiais nesta faixa granulométrica não respondem bem à separação gravítica e, por isto, os resultados referentes a estas faixas seriam indiferentes para a pesquisa.

Além disto, não foi possível analisar a fração [1.000-840] μm , devido ao elevado tamanho das partículas e ao número limitado de recursos para a realização dos testes. Para analisar um número considerável de partículas, seria necessário construir-se várias seções polidas, o que tornaria o processo muito caro para a pesquisa em questão. Desta forma, optou-se por fazer esta simplificação. De qualquer modo, as porcentagens de material contidos nestas faixas em todos os produtos são relativamente pequenas, sendo menores do que 10% em todos os casos.

4.6. Aquisição de imagens no microscópio ótico de luz refletida

Para a aquisição das imagens foi utilizado um microscópio marca Leitz/Leica, modelo Orthoplan Pol, com câmera digital Canon PowerShot S80, pertencente ao Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN-UFMG). O microscópio foi ajustado para operar com luz refletida simplesmente polarizada. A câmera do microscópio foi configurada para capturar imagens RGB com quantização de 24 bits e resolução espacial de 1600x1200 pixels.

Antes de iniciar a aquisição de imagens para cada uma das seções polidas ([75-106] μm , [106-150] μm , [150-212] μm , [212-300] μm , [300-600] μm e [600-840] μm), o microscópio foi previamente configurado para que todas as imagens fossem capturadas nas mesmas condições:

- a sensibilidade da câmera, a exposição e o ajuste de branco foram inicialmente otimizados e mantidos constantes na captura de todas as imagens.
- a iluminação foi mantida constante pelo controle de tensão da lâmpada.
- para a correção de fundo das imagens foi utilizado um padrão feito de resina epóxi devidamente polido. Uma imagem desse padrão foi registrada para posteriormente ser utilizada em um processo automático de correção de fundo.

Na aquisição de um conjunto de imagens de uma mesma seção polida, a manutenção dos parâmetros de configuração do microscópio é um fator muito importante. Dessa forma, as imagens capturadas apresentam características de intensidades semelhantes. Isso quer dizer que para uma determinada fase, a faixa de intensidades de cinza que a caracteriza irá se apresentar na mesma região do histograma, para todas as imagens amostradas. Este procedimento permite definir uma configuração ideal do sistema para tratar todas as imagens do conjunto amostrado.

4.7. Análise de imagens no *Opt_{Lib}*

Após a aquisição das imagens digitais, os arquivos obtidos foram submetidos a um estágio de pré-processamento constituído de: correção de fundo, nitidez, delimitação e suavização. O processo completo de análise de imagens no *Opt_{Lib}* é descrito em detalhes em DELBEM, 2014. É importante citar que foram analisadas aproximadamente 600 partículas para cada faixa de tamanho.

A partir da análise das imagens no *Opt_{Lib}*, determinou-se a proporção em área dos minerais constituintes das amostras em cada fração granulométrica conforme exemplificado na Figura 4.3, permitindo assim, o cálculo da densidade individual de cada partícula através da Equação 01.

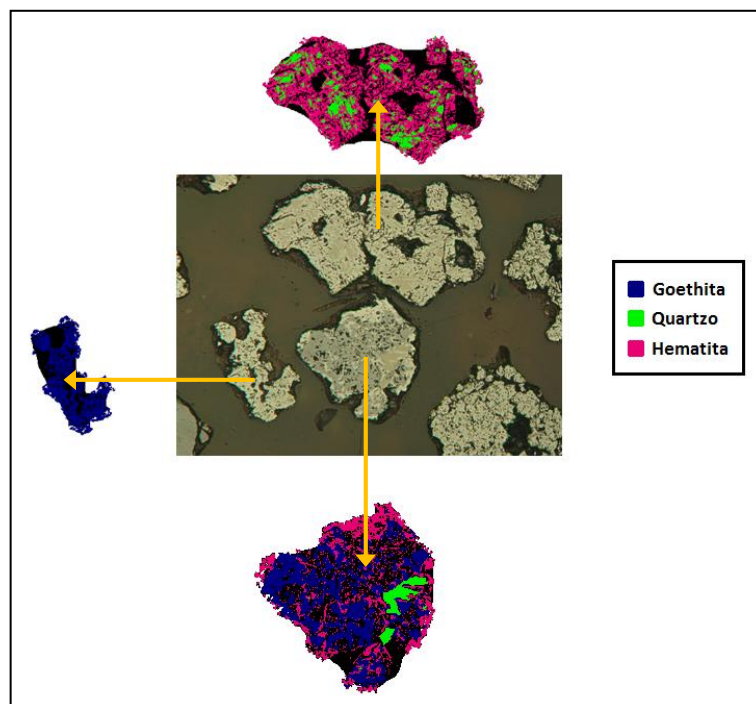


Figura 4.3. Proporção em área dos minerais constituintes das amostras

$$d_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \rho_i}{A_T} \quad (01)$$

Onde,

- d_{pi} é a densidade relativa da *i*ésima partícula;
- A_i é a fração em área da fase *i*;
- ρ_i é a densidade da fase *i*;
- A_T é a área total das partículas em unidades de pixels.

A área total da partícula considera também a área de poros, atribuindo a ela, densidade zero. É importante salientar que os valores de densidade considerados para os minerais constituintes das amostras (determinados através de difração de raios-x) foram retirados da literatura técnica existente sobre mineralogia. A Figura 4.4 abaixo exemplifica a metodologia apresentada acima, considerando uma amostra de carvão mineral.

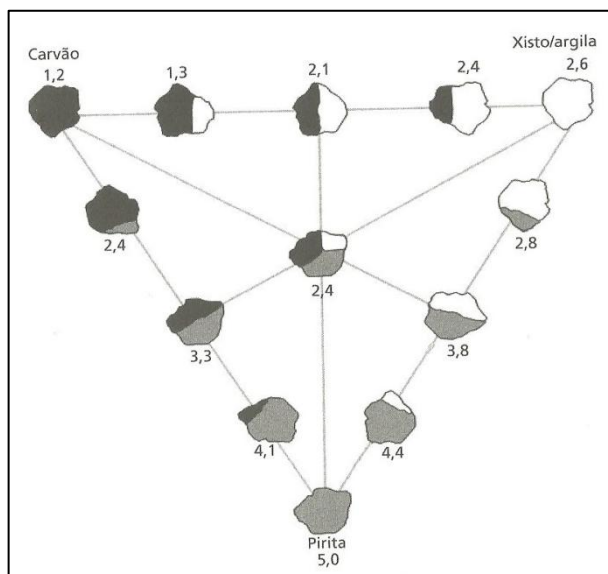


Figura 4.4. Distribuição de densidades para carvão mineral

Fonte: CHAVES e FILHO, 2013

A partir das densidades calculadas para cada partícula individual e considerando todas as frações analisadas em conjunto com as distribuições granulométricas das amostras, foi possível construir a curva de lavabilidade dos materiais ensaiados.

5. RESULTADOS

Foi desenvolvida uma metodologia para construção de curvas de lavabilidade utilizando análise digital de imagens através do uso do software OptLib. Esta metodologia permite determinar as densidades da partícula a partir de sua composição mineralógica e da porcentagem em área de cada mineral constituinte. Através destas informações é possível determinar a distribuição de densidade de um dado material e, assim, construir a sua curva de lavabilidade. Os resultados obtidos no decorrer do trabalho são apresentados a seguir.

5.1. Espiral concentradora

A distribuição mássica dos produtos dos testes realizados com a espiral concentradora é apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Distribuição em massa dos produtos da espiral concentradora

Produto	Distribuição em massa (%)	Teores (%)				
		Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P
Alimentação	100,0	31,63	0,77	53,15	0,90	0,018
Concentrado	58,7	50,65	0,76	25,32	0,74	0,016
Rejeito	41,3	4,64	0,78	92,66	1,12	0,020

Como é possível observar uma maior quantidade de material foi direcionado para o produto concentrado do equipamento. Os resultados das análises granulométricas realizadas com as amostras coletadas na espiral concentradora são apresentadas na Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4.

Tabela 5.2. Análise granuloquímica da alimentação da espiral concentradora

Malha (μm)	Massa (%)		Teores (%)				
	Simples	Ac. Pass.	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P
1000	2,2	97,8	20,12	1,51	69,85	0,63	0,02
850	3,1	94,6	23,91	1,19	64,19	0,90	0,02
600	13,0	81,7	28,09	0,49	59,81	0,43	0,02
300	40,0	41,7	33,25	0,59	51,81	0,42	0,01
212	18,4	23,3	34,37	0,76	49,42	0,48	0,01
150	10,6	12,7	31,13	1,03	53,40	0,65	0,02
106	4,8	7,9	33,34	1,38	50,51	0,97	0,02
75	3,8	4,1	30,89	1,33	52,32	1,53	0,03
38	2,3	1,8	32,43	1,19	47,96	3,35	0,05
<38	1,8	0,0	19,71	0,56	47,07	16,37	0,14
Teor global	100,0	-	31,63	0,77	53,15	0,90	0,018

Tabela 5.3. Análise granuloquímica do concentrado da espiral concentradora

Malha (μm)	Massa (%)		Teores (%)				
	Simples	Ac. Pass.	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P
1000	0,8	99,2	61,60	2,05	9,62	1,02	0,02
850	1,5	97,7	62,10	1,40	7,70	2,19	0,02
600	8,1	89,6	65,40	0,67	5,09	0,71	0,02
300	34,9	54,6	61,99	0,53	9,43	0,60	0,01
212	23,2	31,5	46,00	0,73	32,00	0,51	0,01
150	15,3	16,2	36,30	0,88	45,60	0,59	0,02
106	7,6	8,6	35,70	1,17	47,10	0,87	0,02
75	5,4	3,2	36,30	1,03	44,60	1,18	0,03
38	2,6	0,6	43,90	1,28	33,10	2,02	0,05
<38	0,6	0,0	39,70	0,71	31,60	7,09	0,09
Teor global	100,0	-	50,65	0,76	25,32	0,74	0,016

Tabela 5.4. Análise granulométrica do rejeito da espiral concentradora

Malha (μm)	Massa (%)		Teores (%)				
	Simples	Ac. Pass.	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P
1000	4,2	95,8	8,52	1,36	86,70	0,52	0,02
850	5,4	90,3	8,97	1,11	86,30	0,40	0,02
600	19,8	70,5	6,48	0,38	91,50	0,27	0,02
300	47,2	23,3	3,03	0,64	96,39	0,22	0,01
212	11,6	11,7	1,48	0,84	98,70	0,38	0,01
150	3,9	7,8	2,48	1,86	96,60	0,99	0,02
106	0,9	6,9	4,77	3,97	91,80	2,22	0,02
75	1,6	5,3	4,28	2,79	90,30	3,24	0,03
38	1,8	3,5	9,50	1,00	77,70	6,02	0,07
<38	3,5	0,0	14,90	0,53	50,80	18,60	0,15
Teor global	100,0	-	4,64	0,78	92,66	1,12	0,020

A partir das tabelas acima, é possível observar que o equipamento funcionou muito bem na fração acima de 300 μm , como era de se esperar, uma vez que equipamentos gravíticos apresentam melhor desempenho em faixas mais grosseiras. A Figura 5.1 abaixo ilustra bem este comportamento.

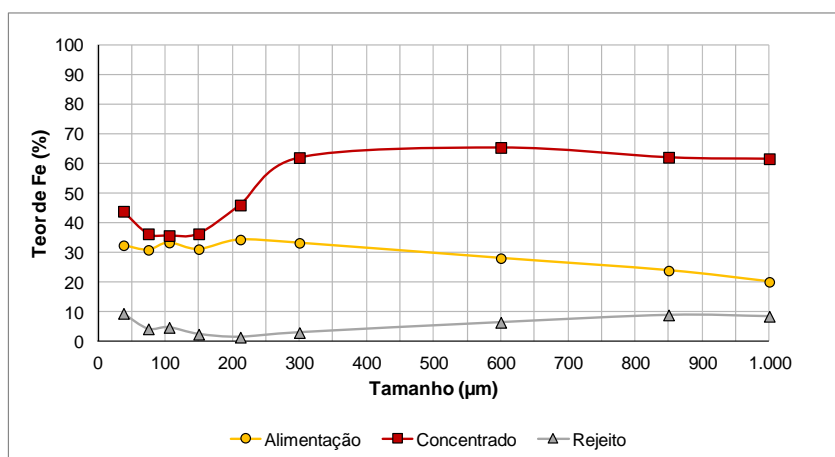


Figura 5.1. Análise granulométrica dos produtos da espiral concentradora

Em relação à granulometria, o concentrado apresentou uma granulometria mais “fina” do que o rejeito, conforme apresentado na Figura 5.2. Tal fato está de acordo com as características do minério, que apresenta grãos de quartzo maiores do que os de óxidos de ferro.

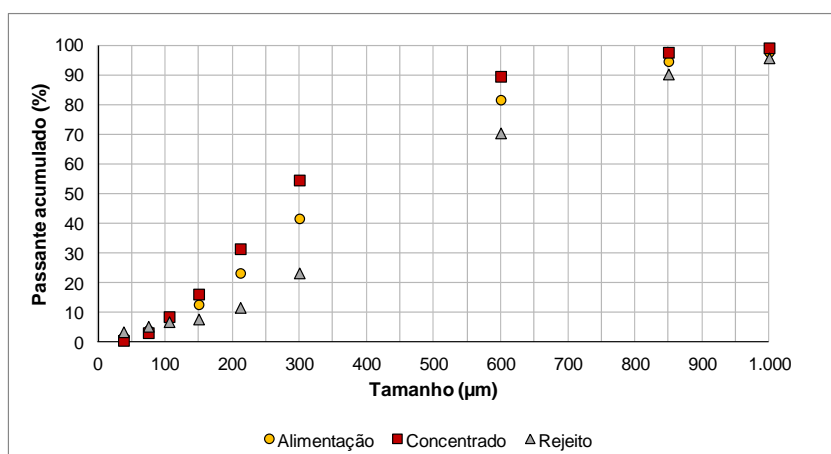


Figura 5.2. Distribuição granulométrica dos produtos da espiral concentradora

As distribuições em massa das frações dos produtos da espiral concentradora são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Distribuição em massa das frações da espiral concentradora

Malha (μm)	Distribuição em massa (%)		
	Alimentação	Concentrado	Rejeito
1000	2,2	0,5	1,7
850	3,1	0,9	2,2
600	13,0	4,7	8,2
300	40,0	20,5	19,5
212	18,4	13,6	4,8
150	10,6	9,0	1,6
106	4,8	4,5	0,4
75	3,8	3,2	0,6
38	2,3	1,5	0,8
<38	1,8	0,3	1,4
Total	100,0	58,7	41,3

5.2. Difração de Raios-X

Previamente ao início dos trabalhos de aquisição das imagens, os minerais presentes na amostra a ser testada foram identificados através de difração de Raios-X. Os resultados

encontrados são apresentados na Tabela 5.6. As densidades apresentadas foram retiradas de Klein e Dutrow (2012).

Tabela 5.6. Composição mineral da amostra

Mineral	Fórmula química	Fase	Densidade (g/cm ³)
Hematita	Fe ₂ O ₃	Majoritária	5,30
Quartzo	SiO ₂	Majoritária	2,65
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Minoritária	5,18
Goethita	FeO(OH)	Minoritária	4,37

5.3. Determinação das distribuições de densidade no Opt_{Lib}

Conforme dito anteriormente, as partículas das frações [75-106] µm, [106-150] µm, [150-212] µm [212-300] µm, [300-600] µm e [600-840] µm foram analisadas no software Opt_{Lib} e as distribuições em massa por faixa de densidade foram determinadas para cada uma delas (aproximadamente 600 partículas foram analisadas em cada fração). Os resultados encontrados são apresentados a seguir e uma breve análise sobre os mesmos é feita mais a frente.

5.3.1. Fração [75-106] µm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [75-106] µm da alimentação da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.3.

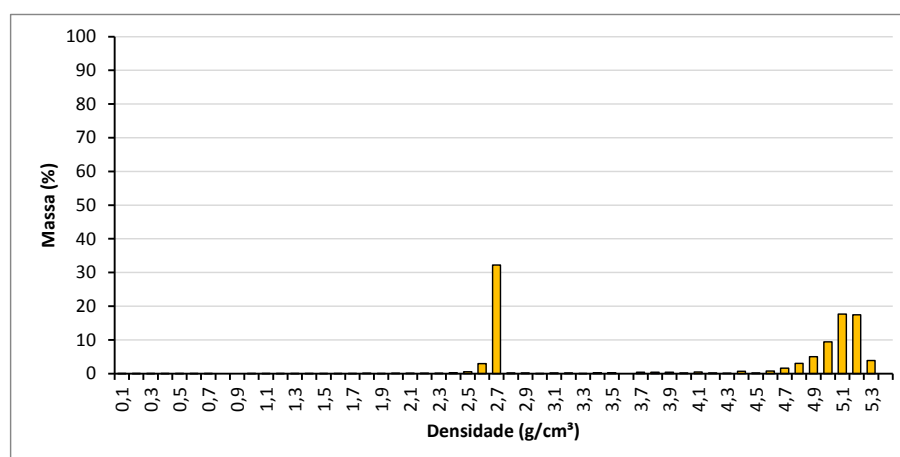


Figura 5.3. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [75-106] µm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [75-106] μm do concentrado da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.4.

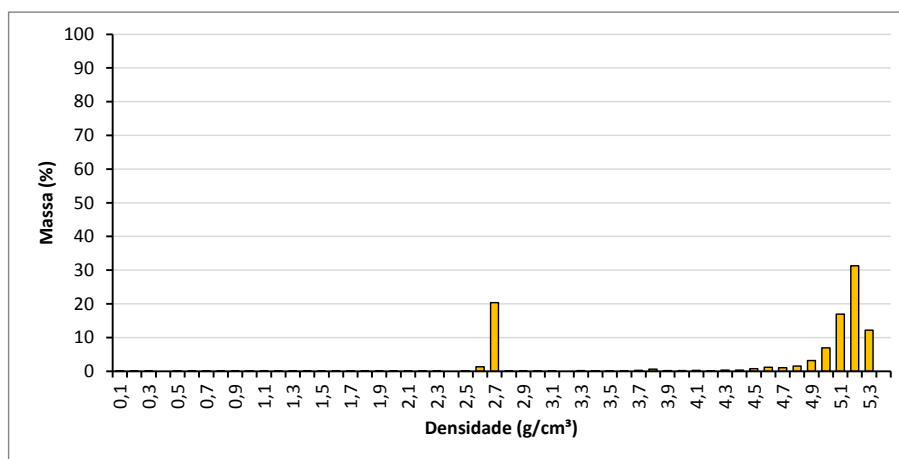


Figura 5.4. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [75-106] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [75-106] μm do rejeito da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.4.

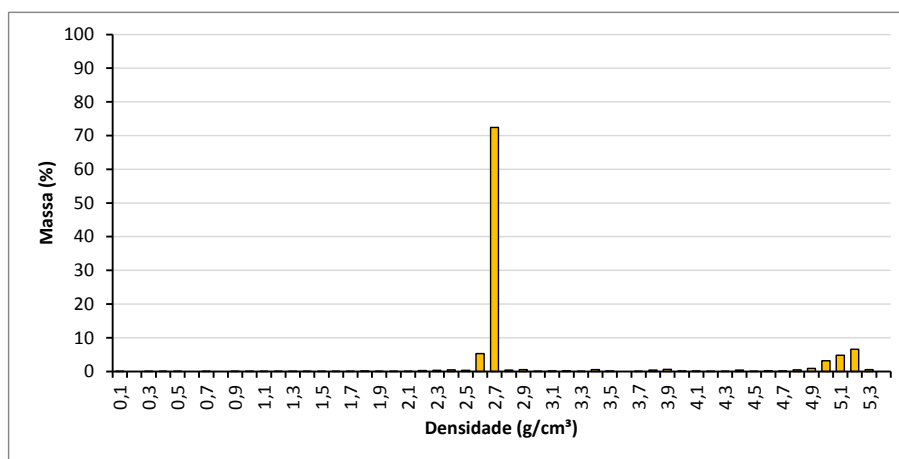


Figura 5.5. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [75-106] μm

De modo a avaliar a consistência dos resultados, a comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [75-106] μm analisada no Opt_{Lib} e calculada através dos produtos concentrado e rejeito, também analisados no Opt_{Lib}, é apresentada na Figura 5.6.

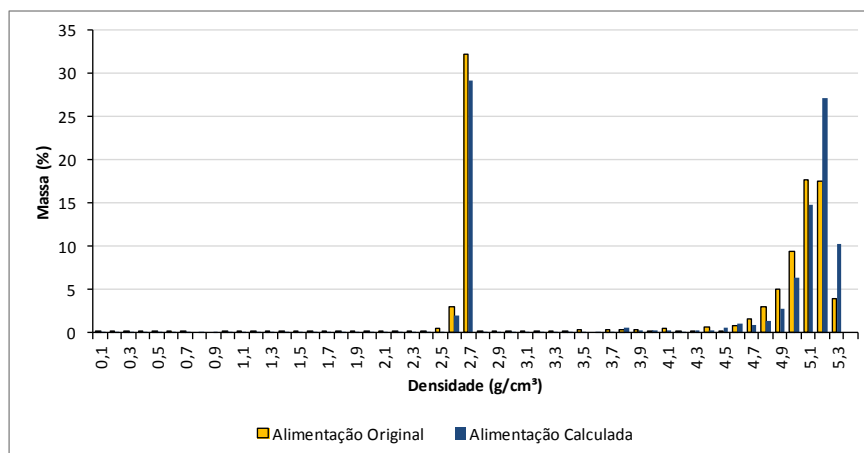


Figura 5.6. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [75-106] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados

Um gráfico contendo a correlação entre os valores acima é apresentado na Figura 5.7.

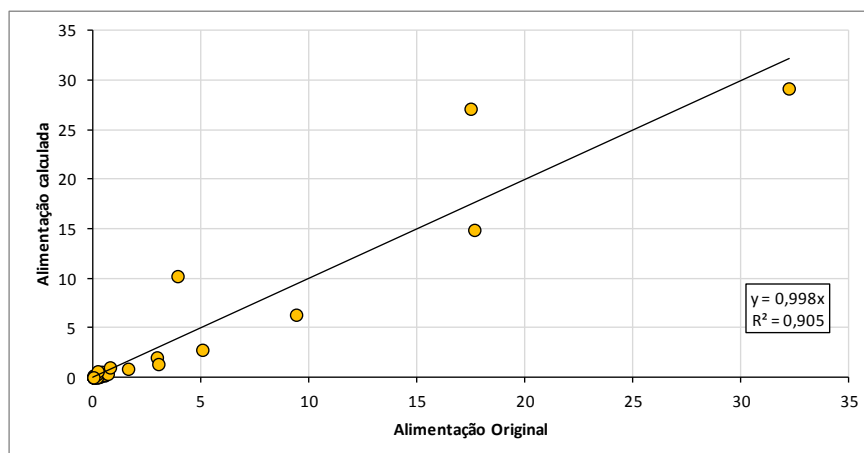


Figura 5.7. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [75-106] μm analisada e calculada

5.3.2. Fração [106-150] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [106-150] μm da alimentação da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.8.

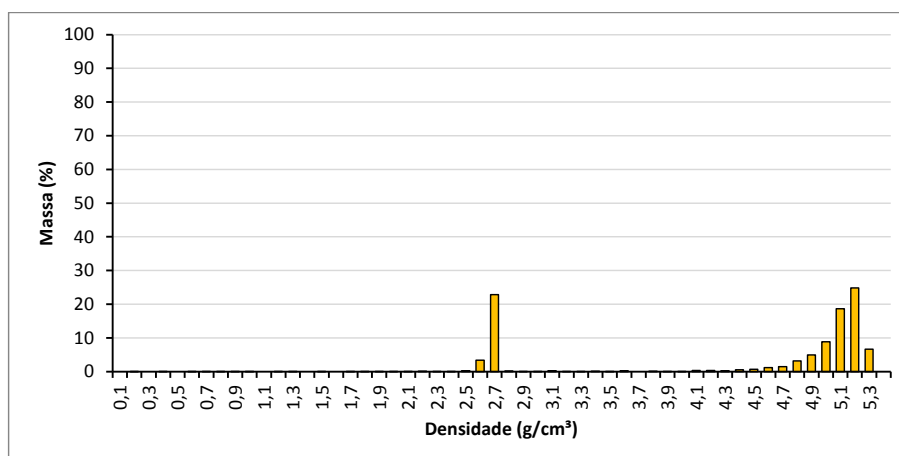


Figura 5.8. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [106-150] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [106-150] μm do concentrado da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.9.

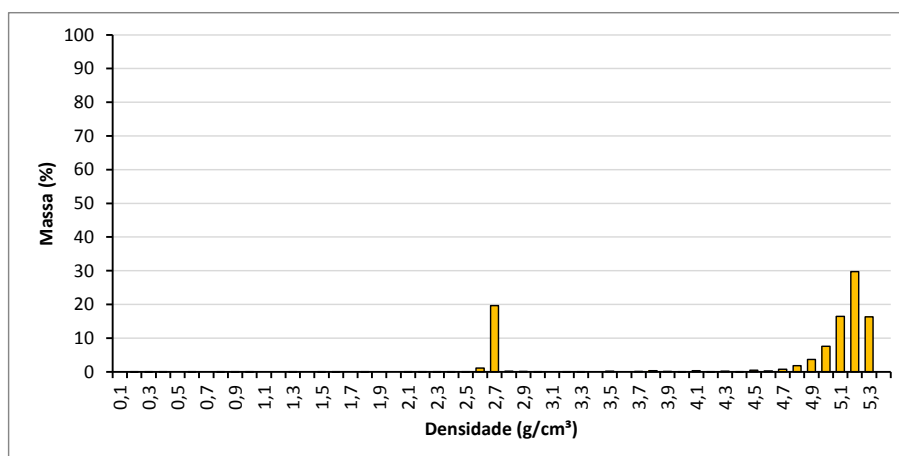


Figura 5.9. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [106-212] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [106-150] μm do rejeito da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.10.

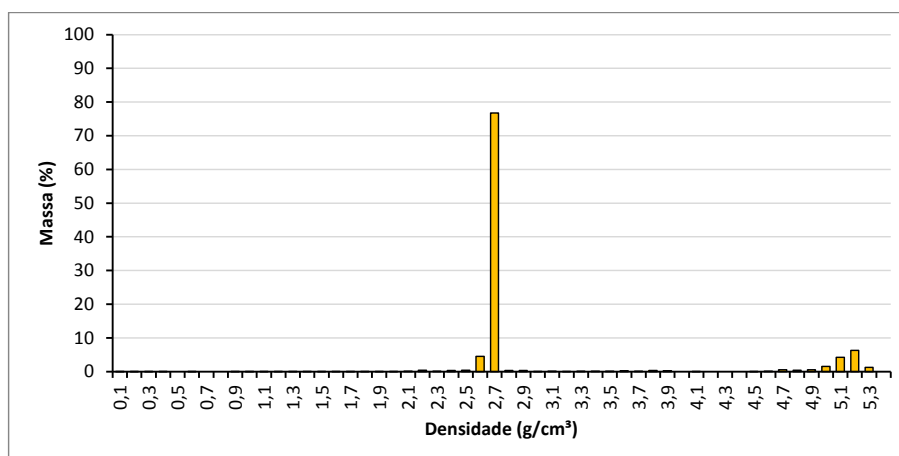


Figura 5.10. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [106-150] μm

De modo a avaliar a consistência dos resultados, a comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [106-150] μm analisada no OptLib e calculada através dos produtos concentrado e rejeito, também analisados no OptLib, é apresentada na Figura 5.11.

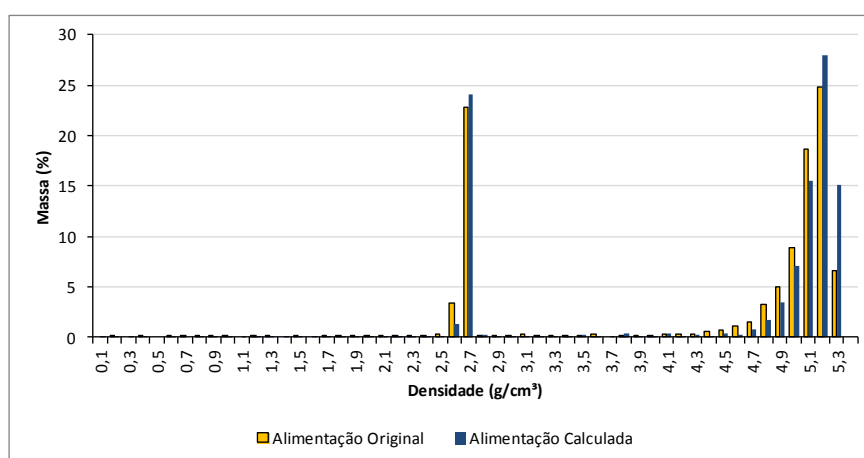


Figura 5.11. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [106-150] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados

Um gráfico contendo a correlação entre os valores acima é apresentado na Figura 5.12.

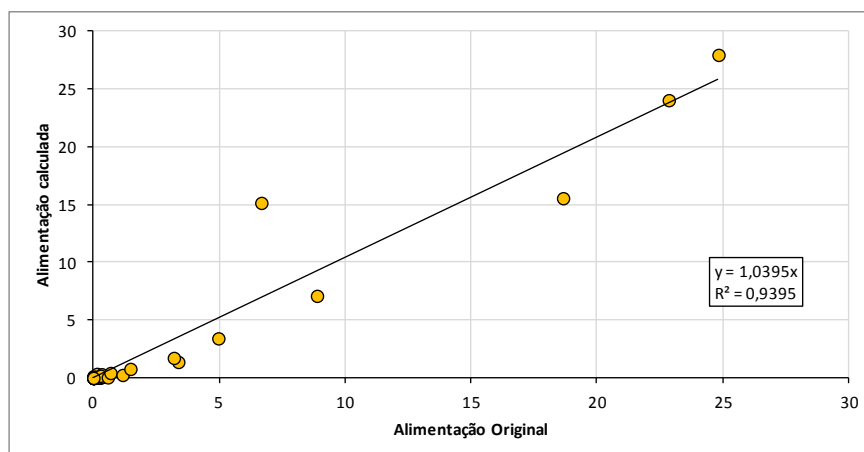


Figura 5.12. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [106-150] μm analisada e calculada

5.3.3. Fração [150-212] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [150-212] μm da alimentação da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.13.

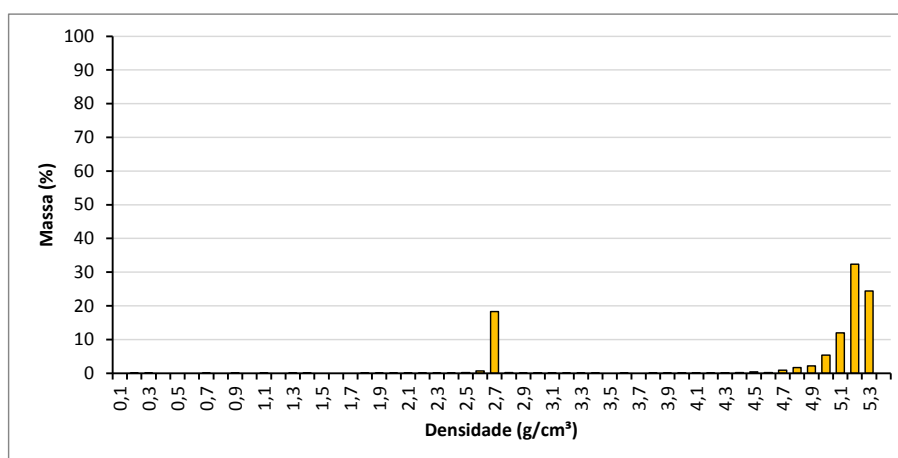


Figura 5.13. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [150-212] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [150-212] μm do concentrado da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.14.

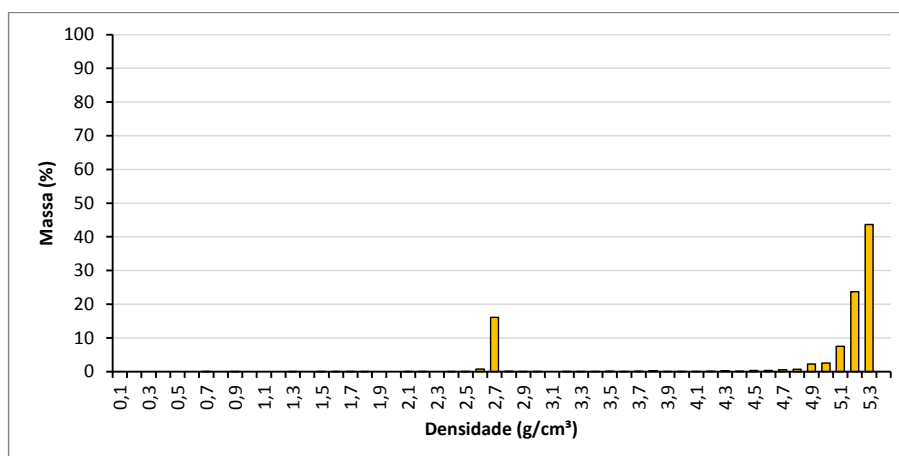


Figura 5.14. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [150-212] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [150-212] μm do rejeito da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.15.

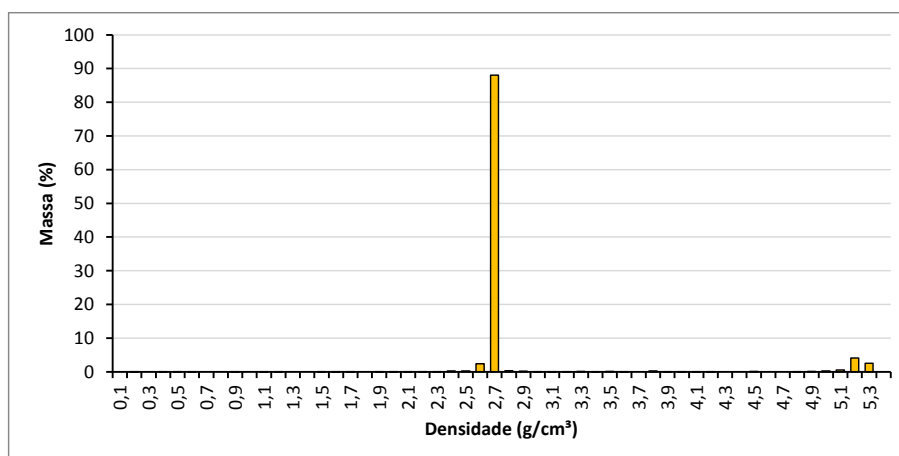


Figura 5.15. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [150-212] μm

De modo a avaliar a consistência dos resultados, a comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [150-212] μm analisada no Opt_{Lib} e calculada através dos produtos concentrado e rejeito, também analisados no Opt_{Lib}, é apresentada na Figura 5.16.

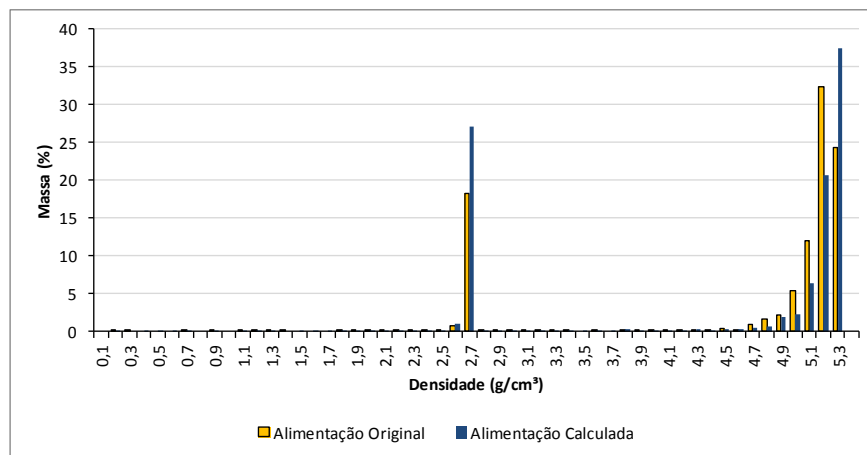


Figura 5.16. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimenta o da fração [150-212] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados

Um gráfico contendo a correla o entre os valores acima   apresentado na Figura 5.17.

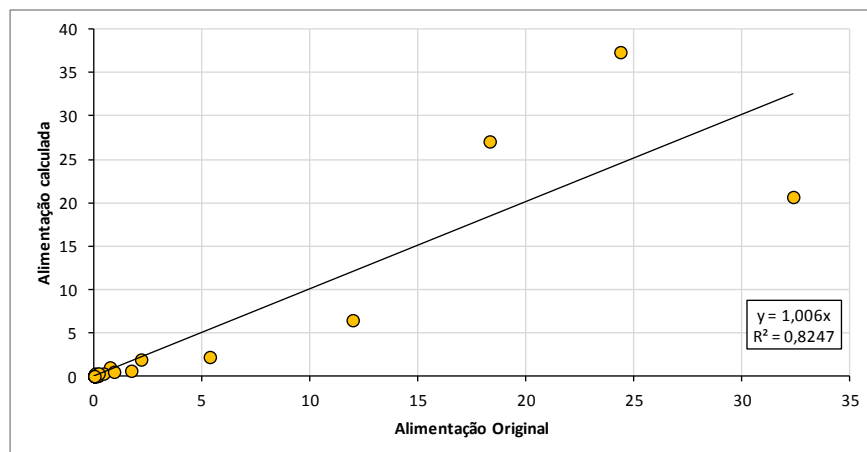


Figura 5.17. Correla o entre distribuições em massa da alimenta o da fração [150-212] μm analisada e calculada

5.3.4. Fração [212-300] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [212-300] μm da alimenta o da espiral concentradora   apresentada na Figura 5.18.

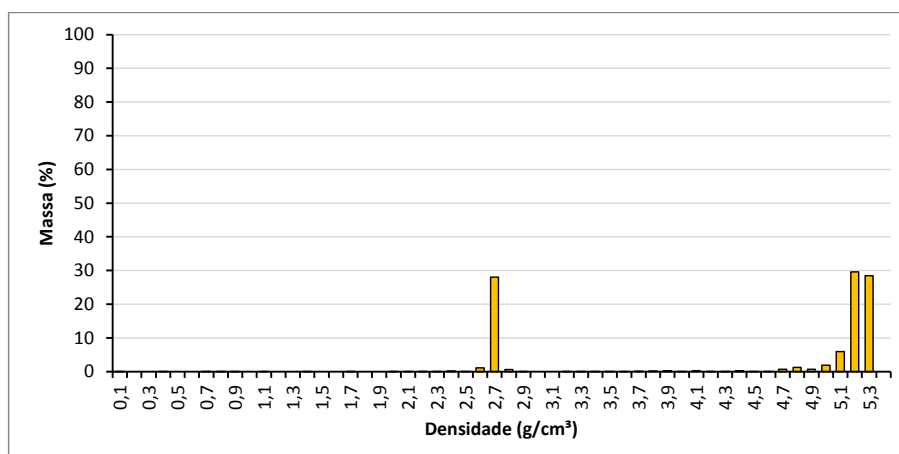


Figura 5.18. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [212-300] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [212-300] μm do concentrado da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.19.

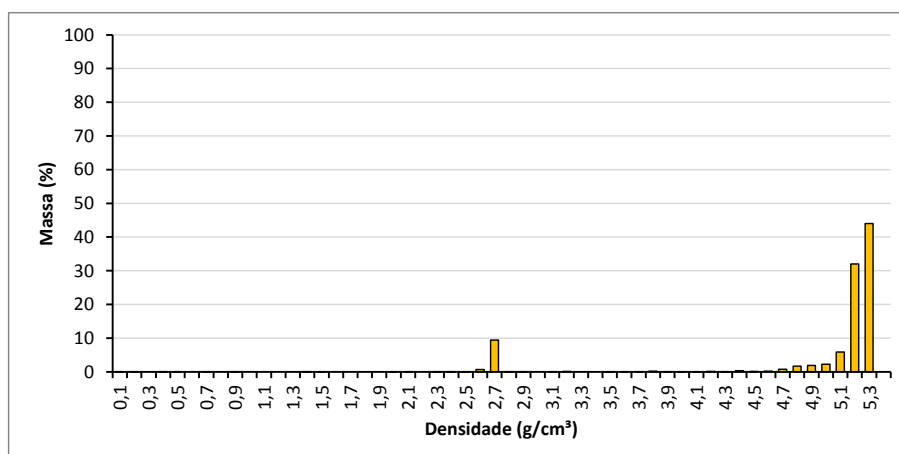


Figura 5.19. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [212-300] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [212-300] μm do rejeito da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.20.

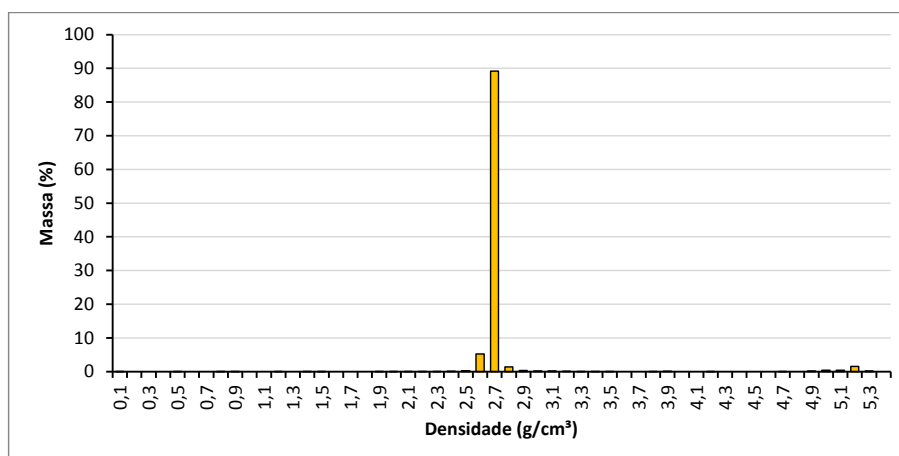


Figura 5.20. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [212-300] μm

De modo a avaliar a consistência dos resultados, a comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [212-300] μm analisada no OptLib e calculada através dos produtos concentrado e rejeito, também analisados no OptLib, é apresentada na Figura 5.21.

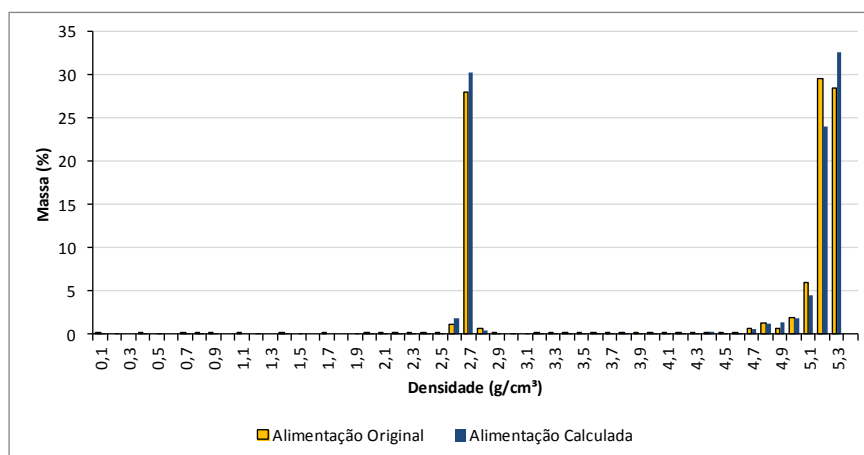


Figura 5.21. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [212-300] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados

Um gráfico contendo a correlação entre os valores acima é apresentado na Figura 5.22.

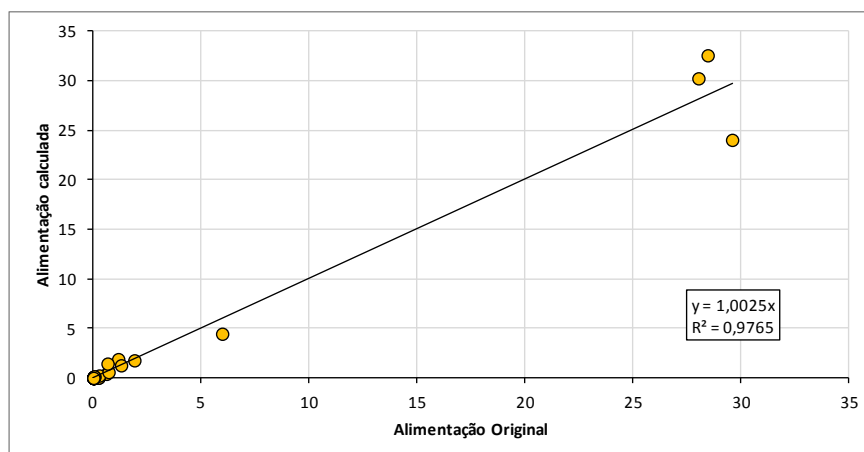


Figura 5.22. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [212-300] μm analisada e calculada

5.3.5. Fração [300-600] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [300-600] μm da alimentação da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.36.

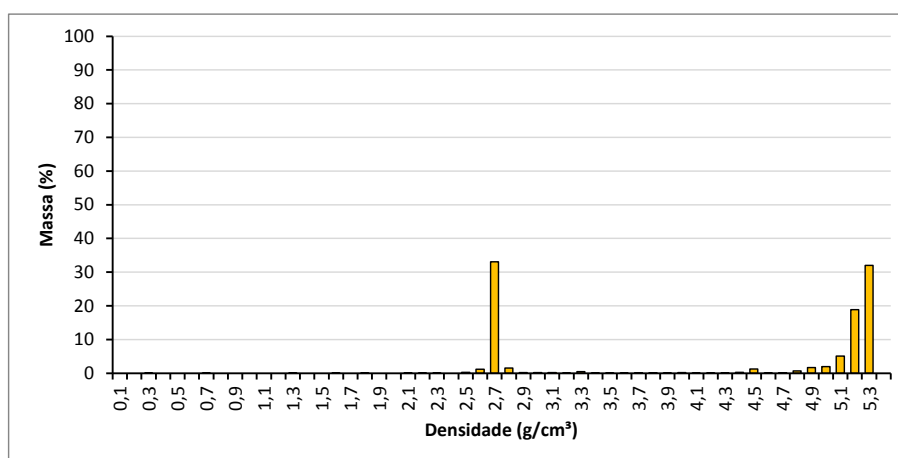


Figura 5.23. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [300-600] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [300-600] μm do concentrado da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.24.

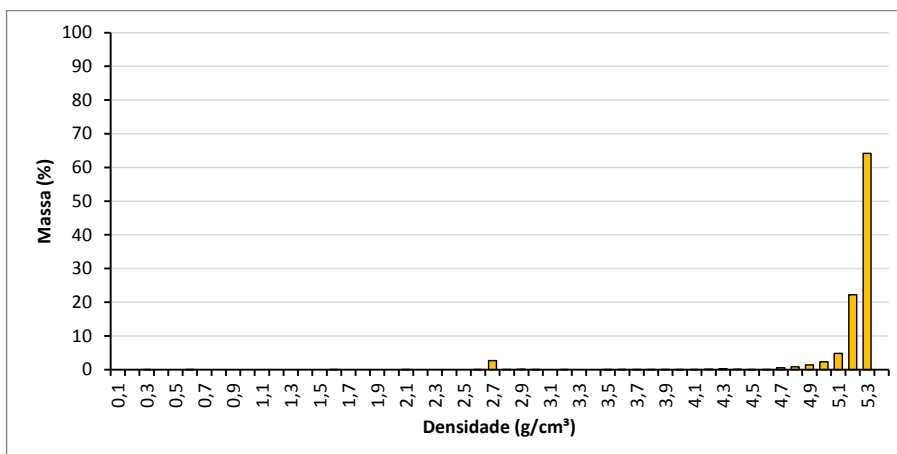


Figura 5.24. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [300-600] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [300-600] μm do rejeito da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.20.

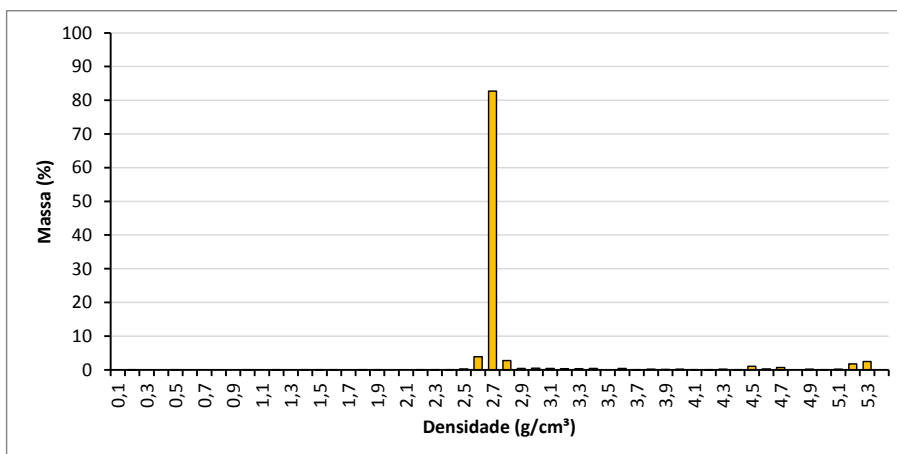


Figura 5.25. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [300-600] μm

De modo a avaliar a consistência dos resultados, a comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [300-600] μm analisada no Opt_{Lib} e calculada através dos produtos concentrado e rejeito, também analisados no Opt_{Lib}, é apresentada na Figura 5.26.

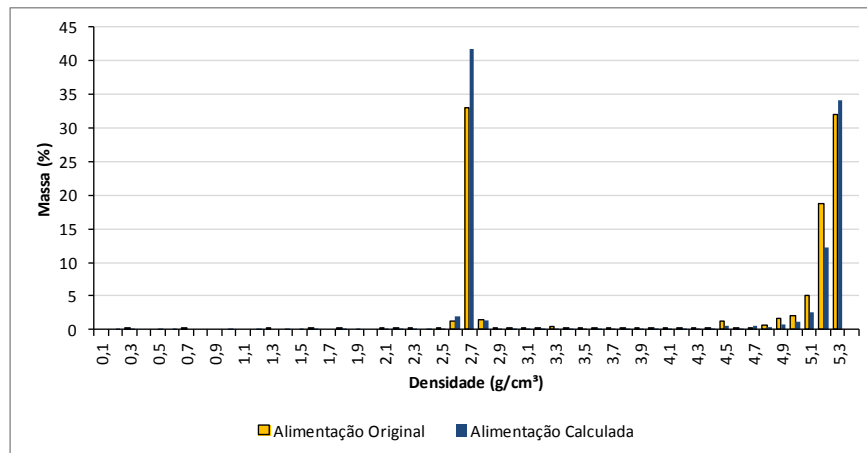


Figura 5.26. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimenta o da fração 300 µm analisada e calculada a partir dos produtos analisados

Um gráfico contendo a correla o entre os valores acima   apresentado na Figura 5.27.

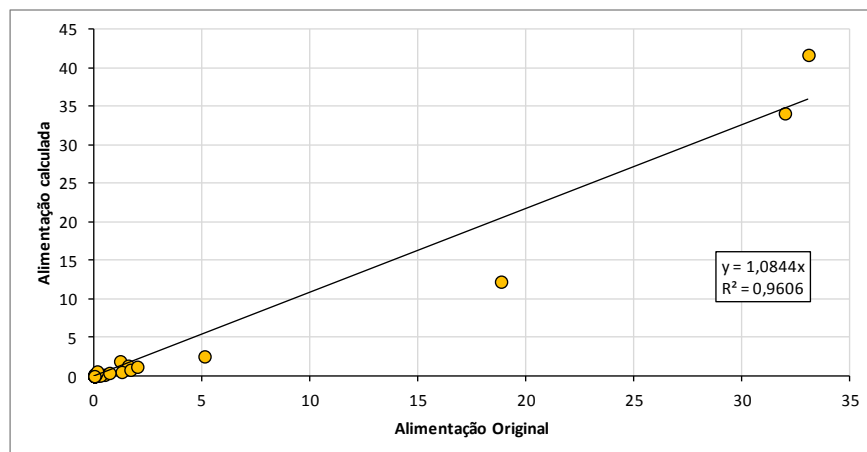


Figura 5.27. Correla o entre distribuições em massa da alimenta o da fração [300-600] µm analisada e calculada

5.3.6. Fração [600-840] µm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [600-840] µm da alimenta o da espiral concentradora   apresentada na Figura 5.28.

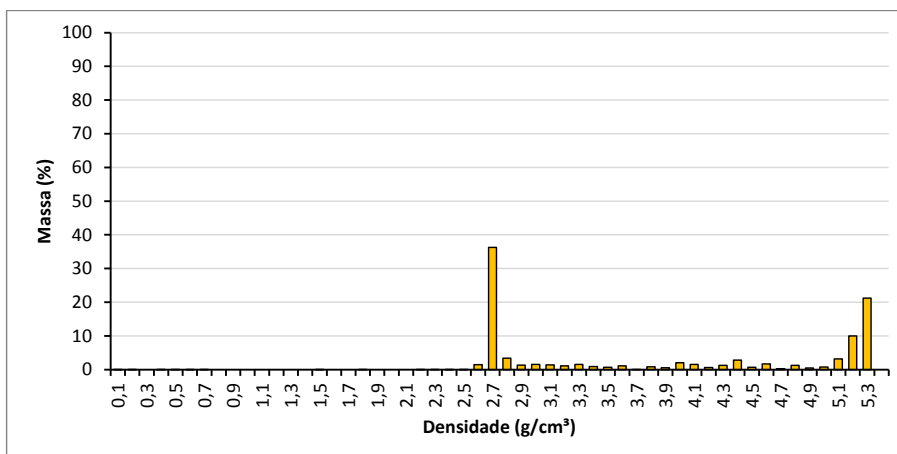


Figura 5.28. Distribuição em massa por faixa de densidade da alimentação da espiral concentradora na fração [600-840] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [600-840] μm do concentrado da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.29.

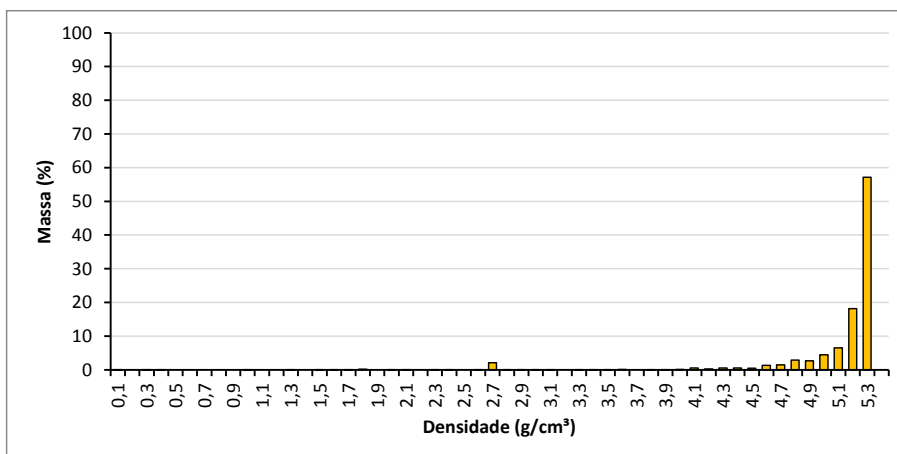


Figura 5.29. Distribuição em massa por faixa de densidade do concentrado da espiral concentradora na fração [600-840] μm

A distribuição em massa por faixa de densidade para a fração [600-840] μm do rejeito da espiral concentradora é apresentada na Figura 5.30.

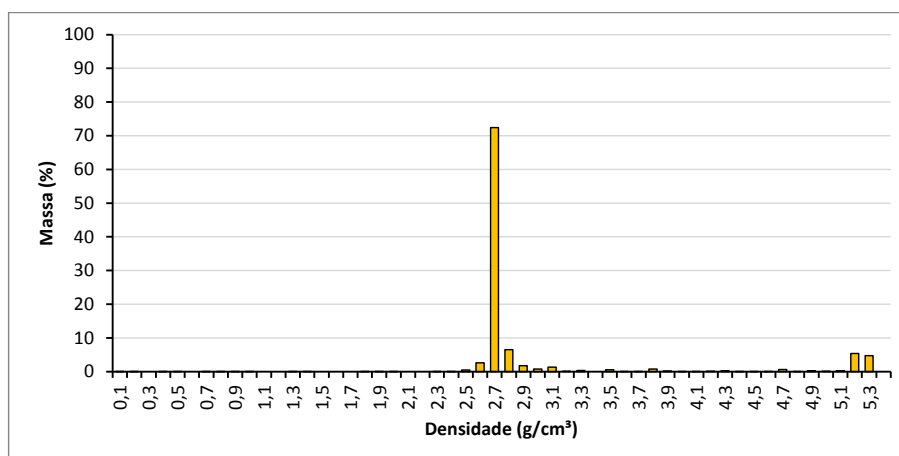


Figura 5.30. Distribuição em massa por faixa de densidade do rejeito da espiral concentradora na fração [600-840] μm

De modo a avaliar a consistência dos resultados, a comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [600-840] μm analisada no OptLib e calculada através dos produtos concentrado e rejeito, também analisados no OptLib, é apresentada na Figura 5.31.

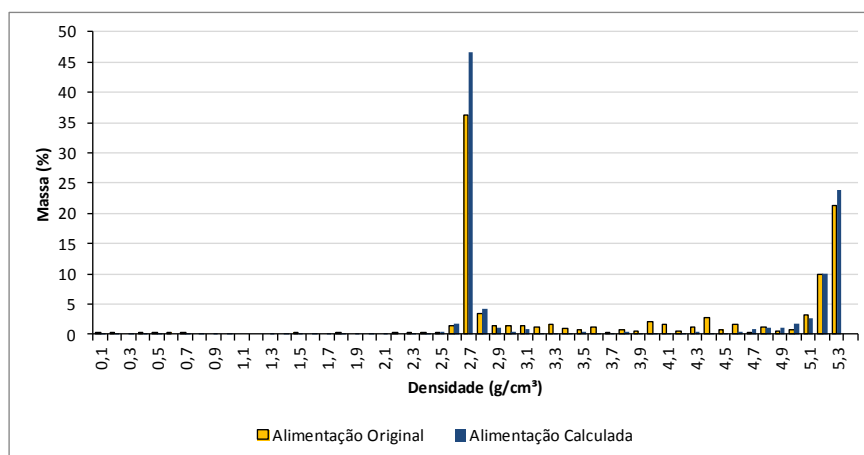


Figura 5.31. Comparação entre as distribuições em massa por faixa de densidade da alimentação da fração [600-840] μm analisada e calculada a partir dos produtos analisados

Um gráfico contendo a correlação entre os valores acima é apresentado na Figura 5.32.

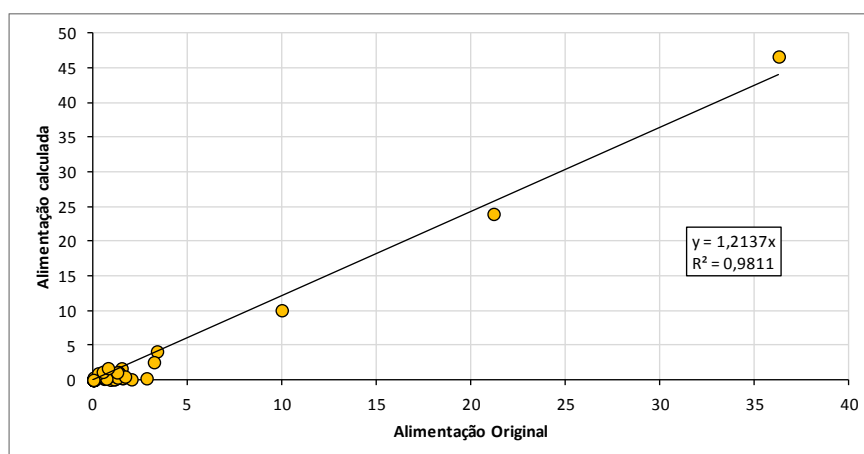


Figura 5.32. Correlação entre distribuições em massa da alimentação da fração [600-840] μm analisada e calculada

5.3.7. Análise das distribuições de densidade determinadas no Opt_{Lib}

A Tabela 5.7 apresenta um resumo dos resultados apresentados nos tópicos anteriores. Para a construção da mesma considerou-se que partículas com densidade entre 0 e 2,65 g/cm³ eram partículas de quartzo, com densidade entre 2,65 e 5,0 g/cm³ eram partículas mistas e com densidade acima de 5,0 g/cm³ eram partículas de óxidos de ferro.

Tabela 5.7. Resumo das análises de densidade no Opt_{Lib}

Faixa	Produto	Distribuição em massa (%)			Teor de Fe (%)	R ²	Incl. da reta (a)
		0 a 2,7 g/cm ³	2,7 a 5,0 g/cm ³	5,0 a 5,4 g/cm ³			
		Quartzo	Partículas mistas	Óxidos de Ferro			
[75-106] μm	Alimentação	36,74	24,24	39,03	30,89	0,9050	0,9980
	Concentrado	22,23	17,35	60,42			
	Rejeito	79,67	8,38	11,95			
[106-150] μm	Alimentação	26,72	23,13	50,15	33,34	0,9395	1,0395
	Concentrado	21,00	16,47	62,52			
	Rejeito	26,72	23,13	50,15			
[150-212] μm	Alimentação	19,40	11,88	68,72	31,13	0,8247	1,0060
	Concentrado	16,93	8,21	74,86			
	Rejeito	91,18	1,65	7,17			
[212-300] μm	Alimentação	29,56	6,41	64,02	34,37	0,9765	1,0025
	Concentrado	10,24	7,85	81,91			
	Rejeito	94,85	3,06	2,09			
[300-600] μm	Alimentação	34,61	9,45	55,94	33,25	0,9606	1,0844
	Concentrado	2,74	6,05	91,21			
	Rejeito	87,04	8,49	4,47			

Faixa	Produto	Distribuição em massa (%)			Teor de Fe (%)	R ²	Incl. da reta (a)
		0 a 2,7 g/cm ³	2,7 a 5,0 g/cm ³	5,0 a 5,4 g/cm ³			
		Quartzo	Partículas mistas	Óxidos de Ferro			
[600-840] μm	Alimentação	37,86	27,77	34,37	28,09	0,9811	1,2137
	Concentrado	2,38	15,82	81,80	65,40		
	Rejeito	75,68	13,98	10,34	6,48		

A partir dos tópicos anteriores e da tabela acima é possível observar que as densidades determinadas pelo Opt_{Lib} estão de acordo com o esperado uma vez que uma maior quantidade de partículas com densidades baixas foram determinadas no rejeito e uma maior quantidade de partículas com densidades elevadas foram determinadas no concentrado. Além disto, fica evidente uma maior eficiência de concentração para partículas maiores do que 300 μm, conforme observado nos resultados das análises granulométricas.

Um fato importante a se destacar, diz respeito à comparação entre as distribuições de densidade analisadas para as alimentações de cada faixa e aquelas calculadas através dos produtos concentrado e rejeito. A partir dos gráficos apresentados é possível observar que os histogramas em ambos os casos apresentaram os mesmos padrões e os valores de R² para as curvas de correlação foram bastante elevados, o que mostra que o Opt_{Lib} trabalhou bem e que os dados gerados possuem consistência e reprodutibilidade.

Quando comparamos os resultados fornecidos pelo Opt_{Lib} com os teores determinados para cada faixa granulométrica dos produtos analisados, percebemos uma boa relação entre os mesmos conforme apresentado na Figura 5.33, Figura 5.34 e Figura 5.35 abaixo.

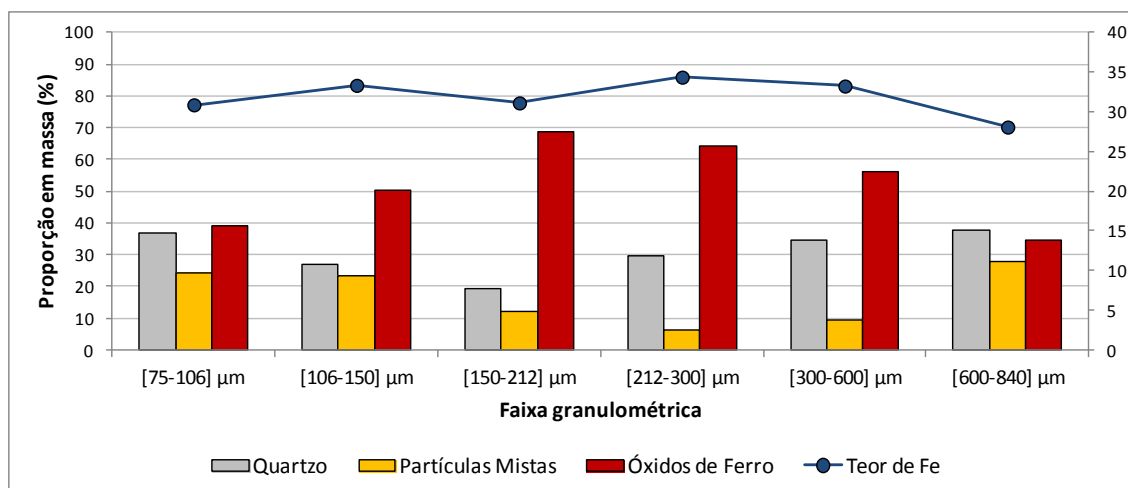


Figura 5.33. Informações da alimentação da espiral concentradora

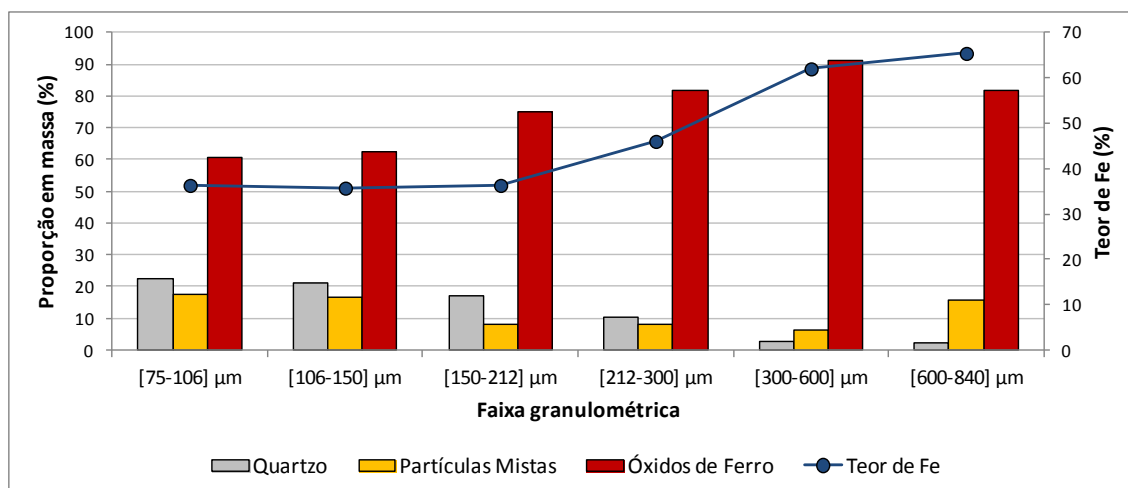


Figura 5.34. Informações do concentrado da espiral concentradora

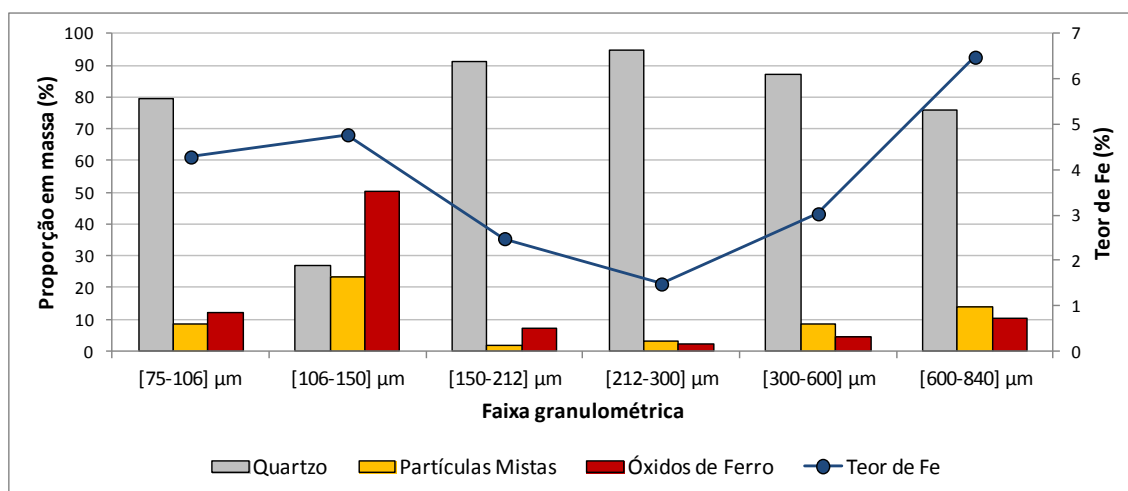


Figura 5.35. Informações do rejeito da espiral concentradora

O gráfico mostra uma evidente correlação entre as proporções de partículas de óxidos de ferro e os teores analisados em laboratório. Este fato é uma boa indicação de que a metodologia proposta é coerente e possui fundamentos sólidos para ser utilizada. A partir disto, o fato que deve ser mais bem detalhado diz respeito a acurácia da técnica. Em outras palavras, é necessário medir a proximidade entre os valores de densidade determinados pelo Opt_{Lib} e os valores de densidade reais. Esforços neste sentido são abordados nas seções seguintes.

5.4. Construção das curvas de lavabilidade

Para a construção das curvas de lavabilidade dos produtos analisados foram utilizados os resultados apresentados anteriormente. Para tanto, ponderou-se as distribuições de densidade pelas distribuições em massa das frações dos produtos do teste com a espiral concentradora, sendo possível, portanto, construir as curvas de lavabilidade dos produtos da espiral concentradora para as faixas analisadas. A curva de lavabilidade da alimentação é apresentada na Figura 5.36.

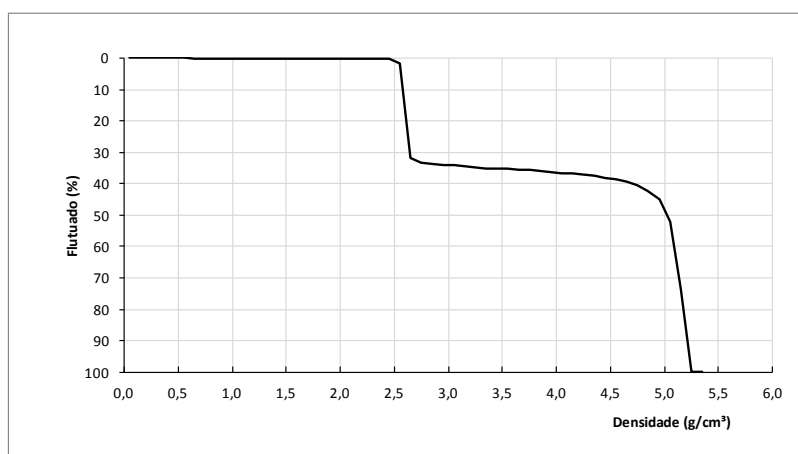


Figura 5.36. Curva de lavabilidade da alimentação da espiral concentradora para a fração [75-840] μm analisada

A mesma curva foi construída considerando as alimentações de cada fração, calculadas a partir dos produtos (concentrado e rejeito) analisados no Opt_{Lib}. Uma comparação entre as curvas geradas é apresentada na Figura 5.37.

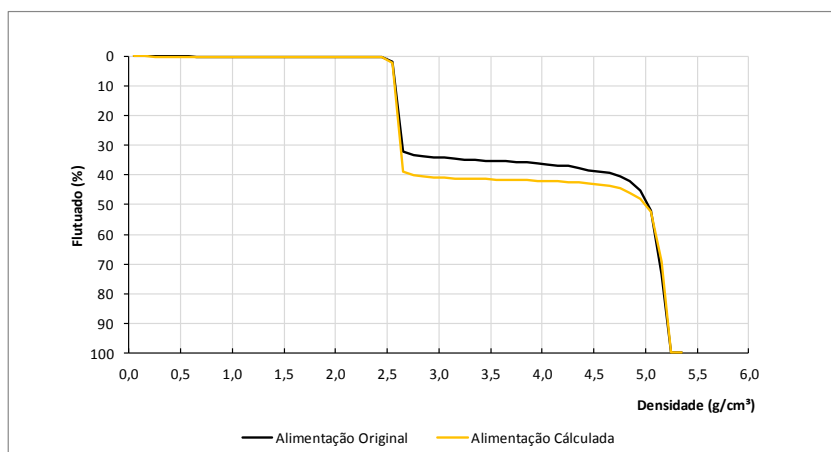


Figura 5.37. Comparação entre curvas de lavabilidade analisada e calculada

O gráfico acima mostra que a curva calculada através dos produtos se assemelha bastante a curva original, o que indica uma boa aderência dos resultados. As diferenças encontradas estão próximas de 5 pontos percentuais, o que é um valor aceitável para o tipo de análise a ser realizado a partir das curvas de lavabilidade.

É válido salientar que grande parte da diferença observada encontra-se na faixa de predominância das partículas mistas. Acredita-se que isto ocorra devido ao fato de informações em três dimensões estarem sendo avaliadas considerando-se informações em duas dimensões. Tal fato é um dos grandes desafios do campo da análise digital de imagens e é solucionado, em parte, através da estereologia, que corresponde a um método para transformar aspectos em duas dimensões em aspectos tridimensionais reais de interesse (KING, 2001).

Neste trabalho não foram abordadas questões relacionadas à estereologia devido à complexidade do método e porque o objetivo aqui era avaliar a aplicabilidade da técnica proposta. Uma vez que a pesquisa apresentou resultados satisfatórios, os próximos passos da mesma devem seguir nesta direção de modo a minimizar os erros descritos acima.

As curvas de lavabilidade do concentrado e do rejeito da espiral concentradora são apresentadas na Figura 5.38 e Figura 5.39, respectivamente.

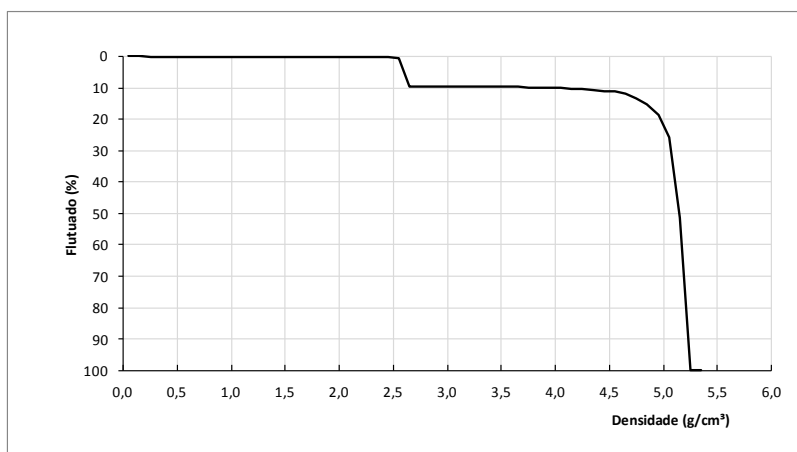


Figura 5.38. Curva de lavabilidade do concentrado da espiral concentradora

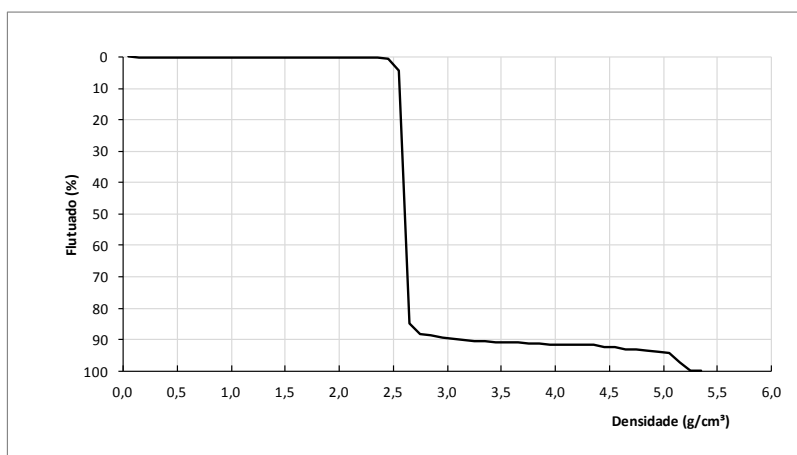


Figura 5.39. Curva de lavabilidade do rejeito da espiral concentradora

5.5. Análise curva de teores

Conforme dito anteriormente, as curvas de lavabilidade são utilizadas em conjunto com as curvas de teor determinadas através das análises dos produtos dos testes de afundamento. O foco do presente trabalho é a construção das curvas de lavabilidade, porém, esforços foram feitos no sentido de estudar uma solução para a determinação das curvas de teor usando a mesma técnica.

Assim sendo, a princípio tentou-se estimar a curva de teores das amostras usando a simplificação de que o minério era composto apenas por quartzo e sílica. Através desta simplificação foi possível calcular a proporção de hematita em cada faixa de densidade

analisada utilizando a Equação 2. Esta ferramenta é muito utilizada para estimativa de teores em ensaios de liberação.

$$PropH = \frac{(100 * \rho I) - (100 * \rho Q)}{\rho H - \rho Q} \quad (2)$$

Onde,

- PropH = Proporção de hematita na faixa analisada;
- ρI = Densidade da faixa analisada;
- ρQ = Densidade do Quartzo;
- Ph = Densidade da Hematita.

A partir da equação acima e sabendo-se o teor crítico da hematita (69,9%), estimou-se os teores para cada classe de densidade utilizando-se o gráfico apresentado na Figura 5.40.

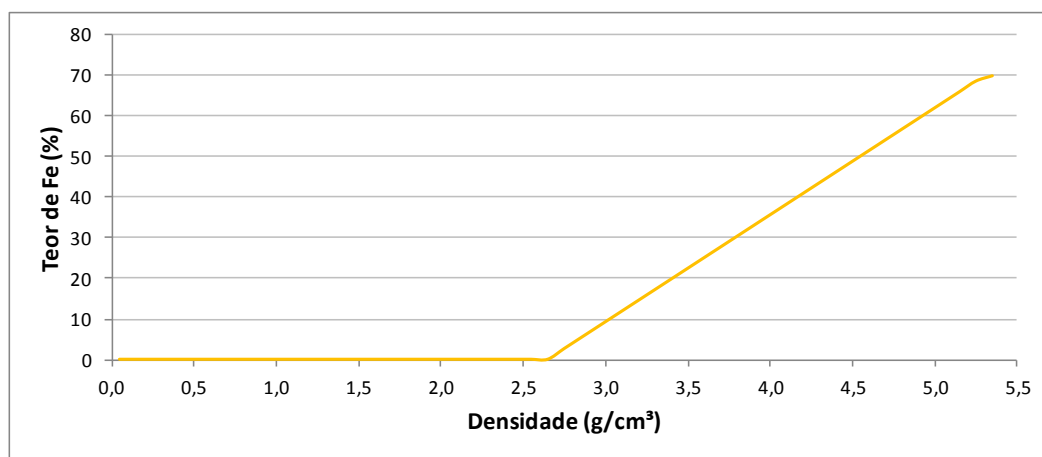


Figura 5.40. Relação densidade x teor de Fe

Ponderando-se os teores de cada classe pelas massas determinadas no Opt_{Lib} foi possível construir as curvas de teor para cada fração analisada. A Tabela 5.8 apresenta uma comparação entre os teores calculados para cada fração através dos dados de densidade e os teores analisados quimicamente em laboratório.

Observando a tabela, é possível perceber que as curvas de teor calculadas não se adequaram bem aos valores de teor determinados em laboratório, gerando uma diferença média de 8,27 pontos percentuais para mais nos teores calculados. Tal fato pode ser explicado pela simplificação adotada para o cálculo dos teores e por distorções estereológicas ao considerar informações em duas dimensões para estimar valores em três dimensões. Desta forma, conclui-se que a construção das curvas de teor não deve ser realizada desta maneira.

Tabela 5.8. Comparação entre teores calculados e teores analisados em laboratório

Faixa	Produtos	Teor Fe (%)		Diferença (pp)
		Real	Calculado	
[75-106] μm	Alim.	30,89	38,20	-7,31
	Conc.	36,30	48,98	-12,68
	Rej.	4,28	11,42	-7,14
[106-150] μm	Alim.	33,34	45,35	-12,01
	Conc.	35,70	50,27	-14,57
	Rej.	4,77	9,89	-5,12
[150-212] μm	Alim.	31,13	52,23	-21,10
	Conc.	36,30	54,66	-18,36
	Rej.	2,48	5,26	-2,78
[212-300] μm	Alim.	34,37	45,91	-11,54
	Conc.	46,00	59,34	-13,34
	Rej.	1,48	1,92	-0,44
[300-600] μm	Alim.	33,25	42,56	-9,31
	Conc.	61,99	66,70	-4,71
	Rej.	3,03	5,02	-1,99
[600-840] μm	Alim.	28,09	31,95	-3,86
	Conc.	65,40	65,49	-0,09
	Rej.	6,48	8,96	-2,48
Média				-8,27

Outra possível opção para a determinação das curvas de teor, seria utilizar o próprio Opt_{Lib} para determinação da proporção em área de cada mineral nas frações analisadas de modo a tornar possível o cálculo do teor médio nas mesmas através da ponderação areal de cada mineral pelo teor crítico do elemento de interesse. Apesar de ser possível obter este tipo de informação no software, o algoritmo ainda não foi desenvolvido e por isto não foi possível determinar os teores desta forma neste trabalho. Com o

desenvolvimento da pesquisa pretende-se implementar a ferramenta descrita acima e comparar novamente os resultados com aqueles determinados em laboratório.

Além da opção apresentada acima, seria possível determinar a curva de teores das faixas analisadas através de uma curva histórica específica de “Densidade x Teor” do minério analisado. Estas curvas são comuns em projetos em operação, pois permitem uma análise expedita dos elementos de interesse com uma boa aproximação em relação aos valores determinados por laboratórios químicos. Infelizmente, não existe esta curva para o material utilizado nesta pesquisa. Uma sugestão para trabalhos futuros seria fazer uma comparação entre os teores determinados pela curva “Densidade x Teor” e aqueles determinados em laboratório.

5.6. Teste de Líquido denso

Um teste de líquido denso foi realizado com a alimentação da espiral concentradora na faixa de [425-1.000] μm nas instalações do laboratório de processos da SGS Geosol utilizando-se o reagente iodeto de metileno com densidade igual a 3,10 g/cm^3 . A distribuição em massa dos produtos gerados no teste é apresentada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Resultados teste de líquido denso

Produto	Distribuição (%)
Alimentação	100,0
Flutuado	52,5
Afundado	47,5

De modo a fazer uma comparação com os resultados do teste com líquido denso, a curva de lavabilidade da alimentação da espiral concentradora foi construída na faixa [840-300] μm (A Figura 5.41.). Apesar de não corresponder a mesma faixa granulométrica do material testado, tentou-se equalizar ao máximo as características das amostras de modo a tornar a comparação possível.

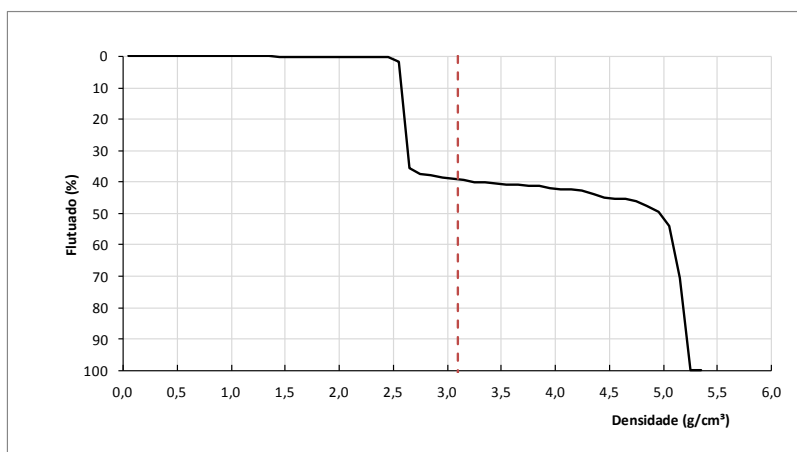


Figura 5.41. Curva de lavabilidade da alimentação da espiral para a fração [840-300]µm

Observa-se que para uma densidade de corte igual a $3,10 \text{ g/cm}^3$ o gráfico prevê que aproximadamente 40% do material flutuaria. A Figura 5.10 abaixo mostra uma comparação entre o resultado real e o resultado teórico.

Tabela 5.10. Comparação líquido denso x curva de lavabilidade

Produto	Distribuição em massa (%)	
	Resultado real	Resultado estimado
Concentrado	52,5	60,0
Rejeito	47,5	40,0

A partir da tabela acima é possível observar uma diferença de 7,5 pontos percentuais entre os resultados encontrados. Esta diferença pode ser explicada pela diferença entre as faixas adotadas em cada análise, sendo que, de acordo com a análise granulométrica apresentada anteriormente, a fração [300-600] µm é uma das que apresenta melhores resultados na espiral concentradora, porque provavelmente possui uma quantidade maior de partículas liberadas de óxidos de ferro. Isto pode explicar o fato da curva de lavabilidade prever uma massa maior de concentrado do que aquela observada na realidade, uma vez que a fração [300-425] µm foi considerada no resultado teórico e não está presente no teste em laboratório.

Apesar disto, considerando-se as questões abordadas acima, a diferença observada não apresentou valor elevado em relação ao tipo de análise em questão, sendo satisfatória a informação obtida através da curva de lavabilidade construída.

5.7. Validação do método

Em uma segunda fase dos testes com a espiral concentradora foi executada uma etapa cleaner no processo utilizando-se as mesmas condições operacionais da etapa rougher conforme apresentado na Figura 5.42.

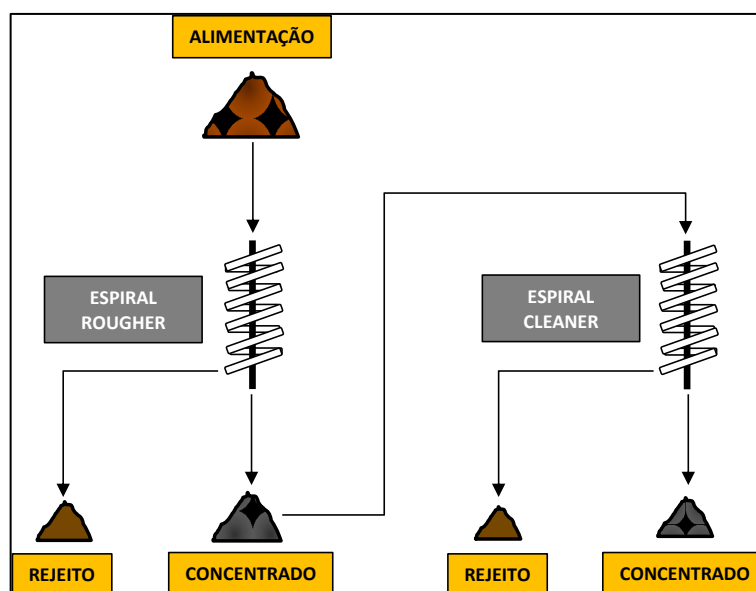


Figura 5.42. Fluxograma da segunda fase de concentração com a espiral concentradora

Para realizar a validação do método proposto, procedeu-se a comparação dos resultados previstos através da curva de lavabilidade construída para o concentrado da espiral rougher e os resultados reais observados no teste com a espiral cleaner.

Para tanto, considerando-se a partição real observada na espiral rougher, determinou-se a densidade de corte do equipamento utilizado no teste, através da curva de lavabilidade construída para a alimentação e considerando a recuperação mássica do rejeito (41,32%) conforme apresentado na Figura 5.43. Este valor foi igual a 4,8 g/cm³.

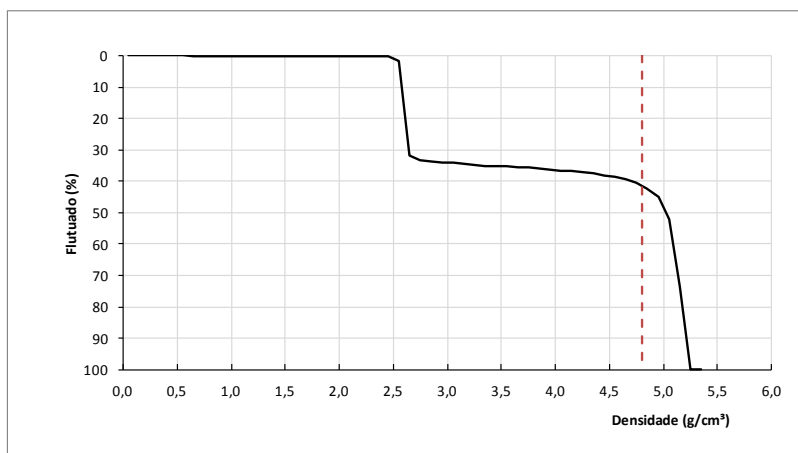


Figura 5.43. Determinação da densidade de corte da espiral WW6E

Como tanto o equipamento quanto as condições operacionais utilizadas no teste com a espiral cleaner foram os mesmos da etapa rougher, adotou-se a premissa de que o equipamento apresentou a mesma densidade de corte nesta etapa.

Utilizando-se a curva de lavabilidade construída para o concentrado da etapa rougher, através das análises com as faixas supracitadas, e considerando-se a densidade de corte igual a $4,8 \text{ g/cm}^3$ (Figura 5.44), estimou-se que a distribuição em massa dos produtos da etapa cleaner seriam iguais àqueles apresentados na Tabela 5.12.

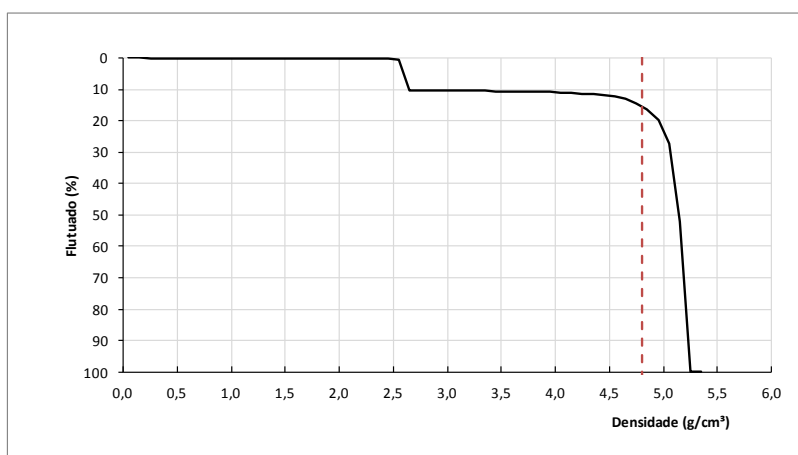


Figura 5.44. Curva de lavabilidade do concentrado da espiral rougher

Tabela 5.11. Distribuição em massa estimada dos produtos da espiral cleaner

Produto	Distribuição em massa (%)
Alimentação	100,0
Concentrado	85,6
Rejeito	14,4

A distribuição em massa dos produtos considerando a fração analisada para a construção das curvas de lavabilidade [75-840] μ m do teste com a espiral cleaner é apresentada na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Distribuição em massa dos produtos da espiral cleaner

Produto	Distribuição em massa (%)
Alimentação	100,0
Concentrado	83,5
Rejeito	16,5

Como é possível observar, a estimativa realizada através da curva de lavabilidade construída se aproximou satisfatoriamente do resultado real observado no teste com a espiral concentradora (diferença de 2,1 pontos percentuais). Uma comparação entre os resultados é apresentada Tabela 5.13.

Tabela 5.13. Comparação entre resultado real e resultado estimado da etapa cleaner

Produto	Distribuição em massa (%)	
	Resultado real	Resultado estimado
Concentrado	83,5	85,6
Rejeito	16,5	14,4

Tal fato indica a consistência da metodologia proposta para a construção de curvas de lavabilidade através da análise de imagens digitais e mostra que esta ferramenta é aplicável para a caracterização de minérios.

6. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho demonstrou-se a possibilidade de construir-se curvas de lavabilidade utilizando técnicas de análise digital de imagens, o que representa um grande avanço no campo da otimização das operações de separação gravítica, principalmente para o tratamento de minérios mais densos, como é o caso do minério de ferro.

Tal fato amplia a aplicabilidade das curvas de lavabilidade para outros campos de atuação diferentes do carvão, tornando possível o uso de uma ferramenta sólida e bem conhecida na separação de distintos minerais.

Neste sentido, os resultados encontrados apresentaram uma boa aderência com a realidade, para o caso estudado, o que indica ser possível prever resultados de separação gravítica previamente à realização de testes físicos. Apesar disto, se faz necessário avançar com a pesquisa de modo a reduzir problemas relacionados ao fato de informações em três dimensões estarem sendo analisadas em duas dimensões, o que pode causar distorções estereológicas, principalmente em faixas de densidade com grande quantidade de partículas mistas.

O impacto de tal fato deve ser avaliado e mensurado de modo a tornar possível determinar a dimensão do erro advindo de tal aproximação e a melhor solução para o problema. Para tanto, se faz necessário dar continuidade a esta pesquisa focando os esforços na validação do método através da realização de testes com outros tipos de minério e testes comparativos entre os resultados determinados através do software *OptLib* e outros determinados em ensaios reais com líquidos densos e equipamentos de concentração.

Além disto, maiores esforços devem ser feitos em prol do desenvolvimento de uma metodologia viável para construção das curvas de teor de modo a auxiliar o engenheiro na tomada de decisão em conjunto com as curvas de lavabilidade.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta é viável e deve ser aprimorada através da continuidade dos estudos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma comparação entre as densidades determinadas pelo software *OptLib* e densidades reais medidas em laboratório.
- Realizar uma comparação entre resultados determinados utilizando-se a metodologia proposta neste trabalho e resultados reais obtidos através de testes flutua-afunda.
- Realizar uma comparação entre resultados determinados utilizando-se a metodologia proposta neste trabalho e resultados reais obtidos em testes com jígues, equipamentos de meio denso, mesas concentradoras e outros equipamentos gravimétricos.
- Realizar análises utilizando a metodologia proposta neste trabalho com outros tipos de minérios.
- Determinar uma metodologia para construção das curvas de teor baseada na análise de imagens digitais.
- Fazer uma comparação entre os resultados obtidos analisando-se números diferentes de partículas em cada seção polida para um mesmo material;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDÃO, P. R. G. In; Introdução ao Tratamento de Minérios. P. 36-42 Editora UFMG 2007.

BURT, R. O. A study of the effect of deck surface and pulp pH on the performance of a fine gravity concentrator. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 5, p. 39-44, 1978.

CHAVES, A. P.; FILHO, R. C. C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Separação Gravítica. Oficina de Textos. São Paulo, 2013.

CHESCOE, D.C., GOODHEW, P.J., 1990. The Operation of Transmission and Scanning Electron Microscopes, *Microscopy Handbook*, first ed. Oxford University Press, Oxford, p. 20.

DA LUZ et al. (Ed.). Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2010.

DELBEM, I. D. Processamento e Análise Digital de Imagens Aplicados aos Estudos de Liberação Mineral. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 2010.

DELBEM, I. D. Caracterização Automatizada de Minérios de Ferro Via Microscopia ótica de Luz Refletida. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, 2014.

DELBEM, I.D.; GALERY, R.; BRANDÃO, P. R. G.; PERES, A. E. C. A 2D mineral liberation analysis and phase recognition system for mineral characterization. *Geomin 2011, 2nd International Seminar on Geology for the Mining Industry*, Antrofagasta, 2011.

FANDRICH, R.; GU, Y.; BURROWS, D.; MOELLER, K. Modern SEM-Based Mineral Liberation Analysis, *Int. J. Miner. Process.*, 84, 2007 p.310-320.

GAUDIN, A.M., 1958. Principle of Mineral Processing. McGraw Hill, New York, N.Y., pp. 70-90.

GOODALL, W. R.; SCALES, J. J.; BUTCHER, A. The Use of QEMSCAN – and Diagnostic Leaching in the Characterization of Visible Gold in Complex Ores, Mineral Engineering, 18, (8), 2005, p.877-886.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Digital Image Processing. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002. Disponível em:

http://www.imageprocessingplace.com/downloads_V3/dip2e_downloads/sample_book_material/Chapter02.pdf

Acesso em 18 de outubro de 2014.

GOLDSTEIN, H. PMI-2201 Microscopia Ótica. Disponível em: http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_6_Microscopia_otica.pdf

Acesso em 02 de abril de 2016.

DELBEM, I.D.; GALÉRY, R.; BRANDÃO, P.R.G.; PERES, A.E.C. Semi-automated iron ore characterisation based on optical microscope analysis: Quartz/resin classification. Minerals Engineering 82 (2015) 2–13. 2015.

KLEIN,C.; DUTROW, B. Manual de Ciência dos Minerais. 23ª Edição. Editora Bookman, 2012.

KING, R. P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. Publicado por Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.

LEONARD J. W.; MITCHELL, D. R.; Coal preparation. The american institute of mining, metallurgical and petroleum engineers, Nova Iorque, 1979.

MEYERS, R. A.; WALTERS, A. D. Coal preparation. Encyclopedia of science and technology, third edition, Elsevier, 2001.

MILLS, C. Process design, scale-up and plant design for gravity concentration. Em: MULAR, A.L.; BHAPPU, R. B. (Ed.). Mineral Processing Plant and Design. Nova Iorque: AIME/SME, 1978. p 404-426.

OLIVEIRA, E. F. Estudo da granulometria em imagens via a modelagem das frequências espaciais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

PEDRINI, H; SCHWARTZ, W. R. Análise de Imagens Digitais - Princípios, Algoritmos e Aplicações. Editora Thomson, São Paulo, 2008.

PIRARD, E. Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy, Mineralogical Magazine, Université de Liège, Liège, Belgium, v.68(2), p.323 –333, April 2004.

PIRARD, E.; LEBICHOT, S.; KRIER, W. Particle Texture Analysis Using Polarized Light Imaging and Grey Level Intercepts, Int. J. of Mineral Processing, v.84, p. 299 – 309., 2007.

SILVA, A. J. C. A.; MONTRESOR, G. C.; FITZHARDINGE, R. J.; MULLATI, J. C.; VERDE, D. C. S. Mineralização em Ferro do Depósito Jambreiro, Guanhães-MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 47, 2014, Salvador.

WILLS, B. A. Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 1997, Oxford.