

# 6

## CAPÍTULO

# **CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E AUTOMAÇÃO DO MÉTODO DE GAUDIN ATRAVÉS DE ANÁLISE DE IMAGEM UTILIZANDO O IMAGEJ**

**Barbosa, -Diego Henrique Braga Maya 1-;**  
**Carlos Silva, André 2;**  
**Mendes, Marcos Vinicius Agapito 3;**  
**Silva, Elenice Maria SCHONS 4**

1 Instrutor em Mineração, Escola SENAI Catalão, Departamento de Mineração, Catalão/GO, Brasil e aluno regular do Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional, Universidade Federal de Goiás, Catalão/GO, Brasil

2 Dr. Professor da Universidade Federal de Goiás, Departamento de Engenharia de Minas, Catalão/GO, Brasil

3 Instrutor em Mineração, Escola SENAI Catalão, Departamento de Mineração, Catalão/GO, Brasil e aluno regular do Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional, Universidade Federal de Goiás, Catalão/GO, Brasil

4 Professora da Universidade Federal de Goiás, Departamento de Engenharia de Minas, Catalão/GO, Brasil

\* **email: [diegohmaya@gmail.com](mailto:diegohmaya@gmail.com)**

---

**Resumo:** Um dos objetivos do uso de softwares em conjunto com as técnicas laboratoriais de caracterização mineral é facilitar e acelerar as operações e ainda, em muitos casos, tornar a análise mais minuciosa. O software de domínio público ImageJ foi utilizado neste trabalho como ferramenta para a automação dos processos do método de Gaudin, aproveitando as técnicas de processamento e análise de imagem, com o emprego de plugins e aplicação de filtros para a realização de uma contagem de grãos automatizada, visando a determinação do grau de liberação. Verificou-se também a eficiência da análise de imagem para a determinação de parâmetros como diâmetro aparente e esfericidade de grãos em amostras de diferentes faixas granulométricas de apatita, com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada de cada faixa granulométrica. Os resultados evidenciaram que quanto menor o tamanho dos grãos, maior o grau de liberação, e, também, que a distribuição de tamanho dos grãos dentro de cada faixa granulométrica se comporta próxima à de uma distribuição gaussiana.

**Palavras-chave:** Grau de liberação; análise de imagem digital; ImageJ

---

## **1. Introdução**

Os minérios de fosfato são rochas naturais que se formam em ambientes geológicos variados, sendo os mais comuns os fosfatos de cálcio do grupo da apatita. Quando em quantidade e concentração suficientes, formam depósitos de valor econômico. Estes minérios podem ser utilizados diretamente, ou após beneficiamento, na manufatura de produtos comerciais. Sua principal aplicação é na agricultura, como fertilizante.

Uma característica importante no tratamento de qualquer mineral é o seu grau de liberação. O grau de liberação, ou espectro de liberação, nada mais é do que a distribuição de composições de partículas em uma população (SCHNEIDER et al., 2010).

Na maioria dos minérios várias fases estarão presentes, e pelo menos, uma fase terá valor econômico e uma outra fase constituirá ganga. Partículas que contém apenas uma fase são chamadas partículas liberadas. Todas as outras partículas que contém mais do que uma fase são chamadas partículas compostas ou não liberadas. A eficiência da recuperação do mineral de interesse na usina depende do seu grau de liberação.

Medir o espectro de liberação não é tarefa fácil, senão esta medida seria praxe em qualquer planta de processamento de minérios. Existem métodos diretos e indiretos para a determinação do grau de liberação. A técnica usada tradicionalmente, por ser de fácil aplicação, é a do fracionamento em líquidos densos. Infelizmente, líquidos densos não podem ser usados com eficiência no fracionamento de minérios que têm densidades de fases de interesse e de ganga muito similares, como no caso da apatita.

Em substituição à técnica de líquido denso, tem-se o método de Gaudin. Este método consiste em identificar o mineral do qual se quer determinar o grau de liberação e contar todas as partículas liberadas e mistas desse mineral em uma amostra. O procedimento é repetido para as faixas granulométricas de interesse, obtendo-se o grau de liberação para cada uma delas. Só é possível aplicar o método quando a cor do mineral de interesse difere-se da ganga. Apesar de simples, o método de Gaudin pode exibir resultados bastante confiáveis. Porém, a contagem das partículas no procedimento requer uma grande demanda de tempo, por ser totalmente manual.

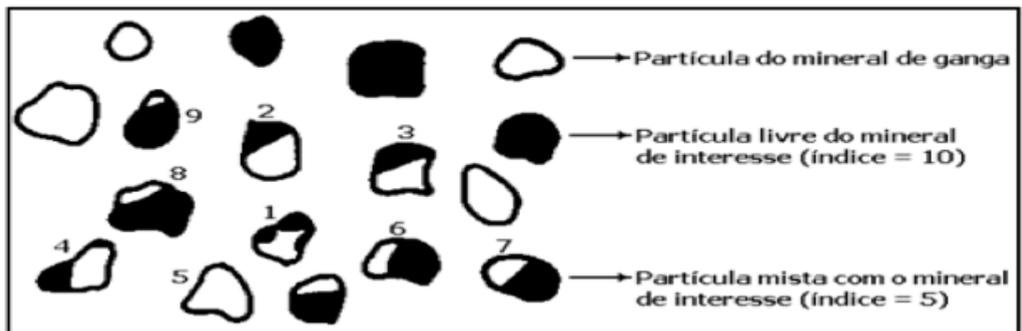


Figura 1 - Um exemplo de matriz de partículas mistas e livres usadas no cálculo do grau de liberação (GAUDIN, 1939 apud LUZ et al 2010).

As técnicas de caracterização combinadas com microscopia óptica são bastante usadas, pois permitem uma análise de amostras em grãos sem a necessidade de montar seções polidas ou delgadas, ao contrário da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O MEV, por ser um equipamento de alto custo e exigir um tratamento das amostras com polimentos e recobrimento com carbono grafite pode inviabilizar as análises quando não se quer uma precisão tão grande.

Utilização de técnicas de PADI para a caracterização de materiais permite a automação de processos, de modo que, a partir de uma amostra representativa e adequadamente preparada, ou de uma imagem digital desta, consiga através de poucos passos em um computador fornecer o resultado da análise requerente. Rotinas de PADI podem seguir uma sequência padrão de etapas para cada tipo de análise e de amostras ou imagens digitais.

Segundo Gomes (2001), o Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma técnica que se utiliza de operações matemáticas para alterar os valores dos pixels de uma imagem digital, modificando-a, para facilitar sua visualização, ou para preparar a imagem para ser analisada pelo próprio computador (Análise Digital de Imagens).

A Análise Digital de Imagens (ADI) consiste na extração e tratamento de dados quantitativos de imagens digitais. Através de ADI pode-se realizar medições mais rápidas, precisas e acuradas, possibilitando ainda a realização de medidas impossíveis de se executar manualmente (GOMES, 2001). Neste trabalho foi usado o termo Processamento e Análise de Imagens Digitais (PADI) para designar ambas técnicas, PDI e ADI, pois na maioria dos casos estas técnicas são relacionadas em conjunto.

Alguns softwares permitem realizar análises matemáticas de imagens digitais determinando parâmetros geométricos das partículas. O ImageJ é um software para processamento e análise de imagens, desenvolvido por Wayne Rasband no National Institute of Mental Health (NIMH), USA, em linguagem Java. Com este software é possível exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8, 16, 32 e 48 bits. Permite o processamento de diversos formatos de imagem como TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM e FITS. Suporta a técnica de empilhamento de imagens, isto é, uma série de imagens que compartilham uma única janela para animações. Além disso, a leitura de um arquivo de imagem pode ser feita paralelamente a outras operações. A janela contendo os resultados (área, perímetro, orientação etc) permite que estes sejam exportados para um arquivo, como por exemplo, no formato XLS (Microsoft Excel) (RASBAND, 2011 apud ALBUQUERQUE, 2012).

Este trabalho tem o propósito de unir as técnicas laboratoriais de caracterização mineral em conjunto com técnicas de processamento e análise de imagem, utilizando um software livre para a simplificação do método de Gaudin visando a determinação do grau de liberação, também, a verificação da distribuição de tamanho dos grãos em cada faixa granulométrica de forma eficiente e com menor custo, utilizando a apatita de Catalão/GO para a validação das análises. Foram publicados trabalhos com uso de softwares pagos como em Mantilla (2013) e, também, Albuquerque (2012) utilizando microscopia eletrônica para análise de partículas de magnetita em escala nanométrica.

## **2. Materiais e métodos**

As amostras de apatita foram oriundas da usina da mineradora Anglo American Fosfatos Brasil pertencente ao grupo Anglo American Brasil. Estas amostras foram retiradas do overflow dos hidrociclones de deslamagem, processo subsequente à moagem primária, realizada por moinho de bolas. As amostras seguiram para o processo de preparação para análise descrito a seguir.

### **2.1. Peneiramento, Filtragem e Secagem**

Primeiramente, as amostras foram peneiradas a úmido utilizando um peneirador vibratório suspenso da marca Engendrar, com uma série de peneiras Tyler de 48#, 65#, 100#, 150#, 200#, 325#. O tempo de peneiramento foi mantido constante e igual a 15 minutos.

A metodologia utilizada no peneiramento laboratorial a úmido foi descrita por Sampaio e Silva (2007). Segundo os autores a amostra deve ser inicialmente empalpada, seguida da sua dispersão feita com uma percentagem de sólidos na faixa de 40 a 50%. A etapa de dispersão consiste em realizar a atrição da polpa em um condicionador de polpa, operando com rotação da ordem de 1.200 RPM, com tempo de atrição da ordem de 10 min, dependendo do caso.

A polpa a ser peneirada foi condicionada utilizando-se um agitador mecânico, com tempo de agitação de 10 minutos. A porcentagem de sólidos não foi controlada uma vez que durante o peneiramento a úmido adiciona-se mais água à polpa durante o peneiramento da mesma.

Na etapa seguinte, todas as frações retidas nas peneiras foram removidas secas utilizando papel filtro e bomba de vácuo. Após a secagem as frações retidas foram secas em estufa com temperatura não superior a 150° C. Finalmente, foram realizadas as pesagens de cada fração retida, para o cálculo da distribuição granulométrica.

### **2.2. Aquisição de Imagens e Análise de Imagens**

Após a secagem, seguiu-se com as amostras para a aquisição de imagens utilizando um sistema avançado de câmera digital acoplado a um estereomicroscópio da marca Laborana, modelo SD5000. Foram adquiridas diversas imagens de cada amostra afim de garantir um mínimo de imagens representativas com resolução e contraste adequados para o processo de análise de imagem.

Com as imagens adquiridas, o software ImageJ foi aplicado em todas as etapas envolvendo processamento e análise das imagens. As imagens receberam um pré-tratamento, utilizando operações de ajuste de contraste e nitidez, além de alinhamento e corte.

Para a determinação da granulometria e esfericidade dos grãos das amostras, é preciso o uso de alguns processos de segmentação e filtros de limiarização (threshold). A aplicação de filtros requer cuidado, pois um exagero pode acrescentar ruídos que interferem na medição dos parâmetros.

A aplicação da segmentação por threshold foi necessária para o cálculo da geometria dos grãos, diferenciando-os do fundo. A operação watershed criou uma divisão entre bordas de grãos sobrepostos, corrigindo o erro de agrupamento de grãos.

A partir desse processo foi possível fazer a contagem e determinação do diâmetro e esfericidade dos grãos. Para um melhor resultado aplicou-se outras operações de threshold para diminuir o efeito das sombras. Após as operações de threshold foi possível detectar as bordas dos grãos e realizar a análise da imagem.

### 2.3. Cálculo do Grau de Liberação

Para realizar a contagem manual dos grãos objetivando o cálculo do grau de liberação utilizou-se o plugin Cell Counter do software ImageJ. Com a imagem ajustada em contraste e brilho adequados, onde os grãos estão diferenciados do fundo, empregando o plugin foi possível fazer a contagem manual dos grãos separando-os em categorias de acordo com a sua característica. Após a contagem de grãos em cada faixa granulométrica realizou-se o cálculo do grau de liberação do mineral.

Para a determinação do grau de liberação, através do método de Gaudin, foi realizada a contagem aleatória de um mínimo de 90 grãos em cada faixa granulométrica, de acordo com a metodologia descrita por Schneider et al. (2012), contando separadamente grãos mistos e grãos liberados.

Como visto na tabela 1, foi admitido que os grãos considerados não liberados são os grãos que apresentaram uma área menor que 90% da sua área total composta por somente uma fase mineral. Os grãos considerados totalmente liberados são os grãos

<b>Tipo</b>	<b>Área do grão composta somente por uma fase mineral</b>
Grão totalmente liberado	90% ou maior
Grão não liberado	Abaixo de 90%

que contém 90% ou mais da sua área total preenchida somente por uma fase mineral.

Após a contagem dos grãos aplicou-se a fórmula matemática (2) que é uma variação da seguinte fórmula matemática (1) para os cálculos percentuais da liberação:

$$\text{Grau de liberação} = \frac{\text{índice de liberação das partículas livres}}{\text{índice de liberação das partículas livres + mistas}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Grau de liberação} = \frac{\text{partículas livres}}{\text{partículas livres + mistas}} \times 100 \quad (2)$$

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1. Análise Granulométrica

Realizou-se análise de cada faixa granulométrica verificando o comportamento da distribuição do tamanho dos grãos. Para tal estudo, fez-se a identificação dos grãos como metodologia descrita acima. A sequência de imagens na figura 5 foi gerada na análise granulométrica de uma das fotografias utilizadas para a malha 48#. As análises de todas as outras malhas granulométricas seguem este mesmo padrão.



Figura 2 - Sequência padrão da análise granulométrica. Pré-tratamento; Aplicação do threshold; Analisador de diâmetro.

Alguns grãos transparentes se confundiram com o background e não foram reconhecidos durante a limiarização devido à similaridade de cores. Os resultados gerados pelo ImageJ das análises de todas as imagens, de cada faixa granulométrica, foram reunidos para a confecção dos gráficos apresentados a seguir.

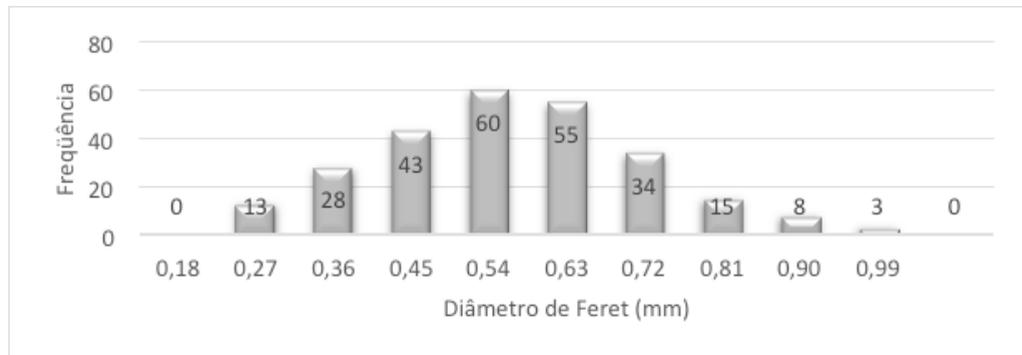


Gráfico 1 - Análise Granulométrica da malha de 48# (0,297 mm).

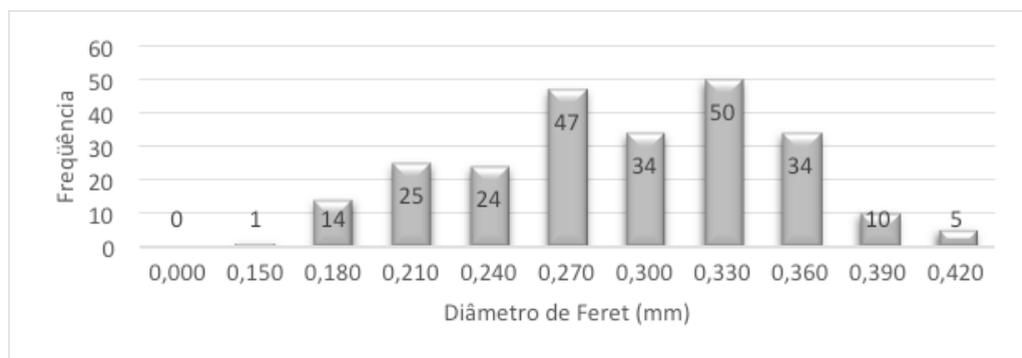


Gráfico 2 - Análise granulométrica da malha de 65# (0,210 mm).

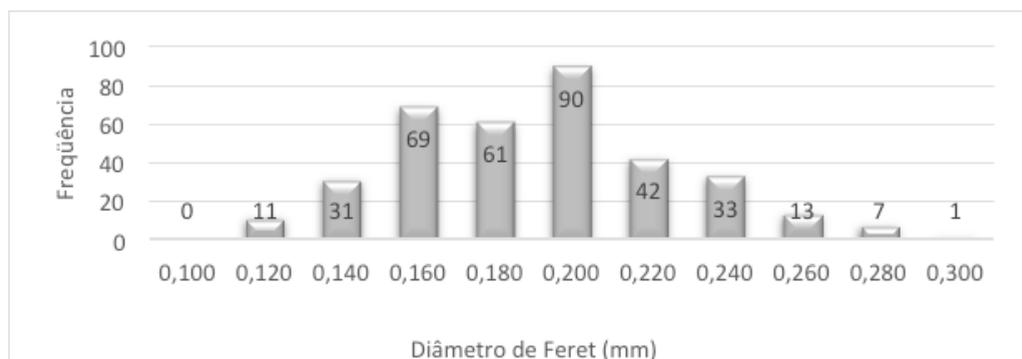


Gráfico 3 - Análise granulométrica da malha de 100# (0,149 mm)

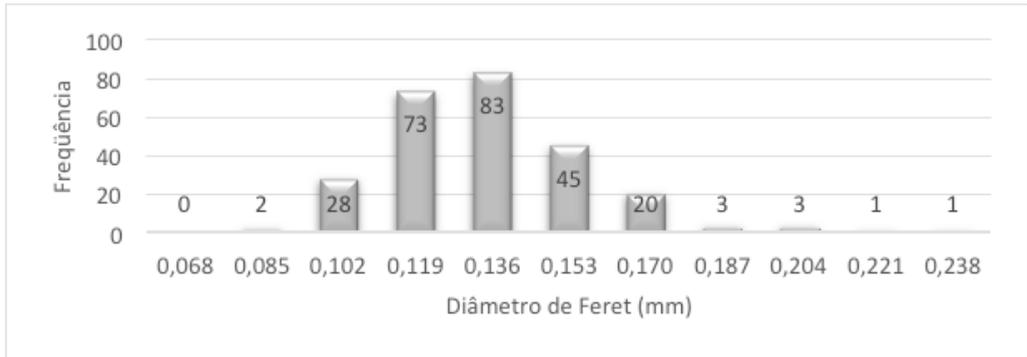


Gráfico 4 - Análise granulométrica da malha de 150# (0,105 mm).

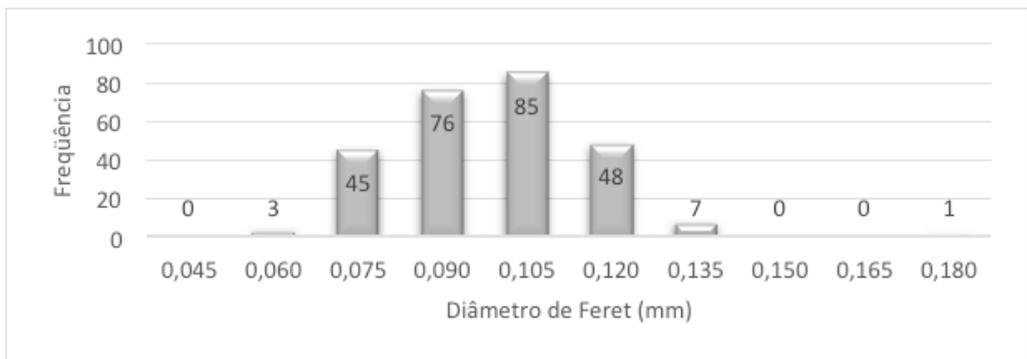


Gráfico 5 - Análise granulométrica da malha de 200# (0,074 mm).

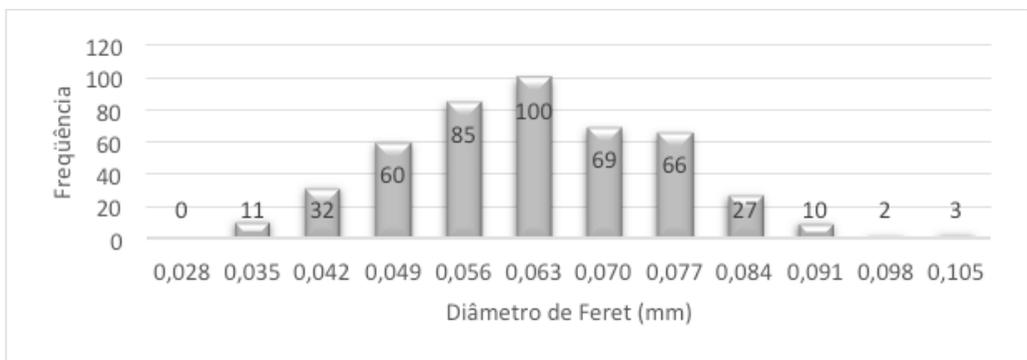


Gráfico 6 - Análise granulométrica da malha de 325# (0,044 mm).

De acordo com os gráficos acima, exibindo a distribuição granulométrica através do diâmetro de Feret dos grãos da amostra, pode-se observar que os tamanhos dos grãos não respeitam totalmente a faixa granulométrica correspondente, alguns grãos extrapolam e outros ficam aquém do tamanho teórico que as faixas deveriam classificar.

A sobreposição de grãos e a sombra causada pela falta de iluminação adequada do equipamento utilizado pode ter influenciado na análise granulométrica. Porém, observa-se que a distribuição dos tamanhos dos grãos segue uma distribuição gaussiana, onde a grande maioria dos grãos corresponde à faixa granulométrica pertencente, sendo possível afirmar que a análise de imagem é eficiente na determinação dos tamanhos dos grãos dentro das faixas granulométricas.

### **3.2. Determinação do Grau de Liberação**

Para a determinação do grau de liberação realizou-se a automação deste método, utilizando para tal fim o processamento e análise de imagem digital. Através do software ImageJ com o uso do plugin Cell Counter foi possível contabilizar de maneira rápida um mínimo de 90 grãos, de acordo com Schneider (2012), requeridos para realizar a análise pelo método de Gaudin.

Observou-se nas imagens que a amostra contém quatro tipos de grãos que se diferenciam pela cor: Apatita (cor marrom rosada); Magnetita (cor preta); Quartzo (transparente) e Vermiculita com brilho vítreo dourado e em formato de micas.

Considerou-se que os grãos com 90% ou mais da sua área contendo somente uma fase mineral são totalmente liberados. Grãos que não se encaixam nessa característica foram classificados como não liberados. Em cada imagem analisada foram contadas diferentes quantidades de grãos aleatoriamente. Os processos em todas as imagens seguiram o mesmo padrão.

No gráfico abaixo observa-se que a quantidade em proporção de grãos não liberados decrescem com a diminuição da malha, seguindo a lógica da teoria de liberação de partículas minerais descrita por Gaudin (1939, apud WILLS, 2006) e Barbery (1992). Nas malhas de 200# e 325# a quantidade em proporção de grãos não liberados são praticamente iguais. A quantidade proporcional de grãos de apatita liberada aumenta até a malha de 100#, quando decresce de forma quase constante até a malha granulométrica de 325#. As quantidades em proporção de grãos liberados de vermiculita permanecem quase constantes. Observa-se que na faixa granulométrica de 200# a sua quantidade proporcional é maior em relação às demais faixas granulométricas.

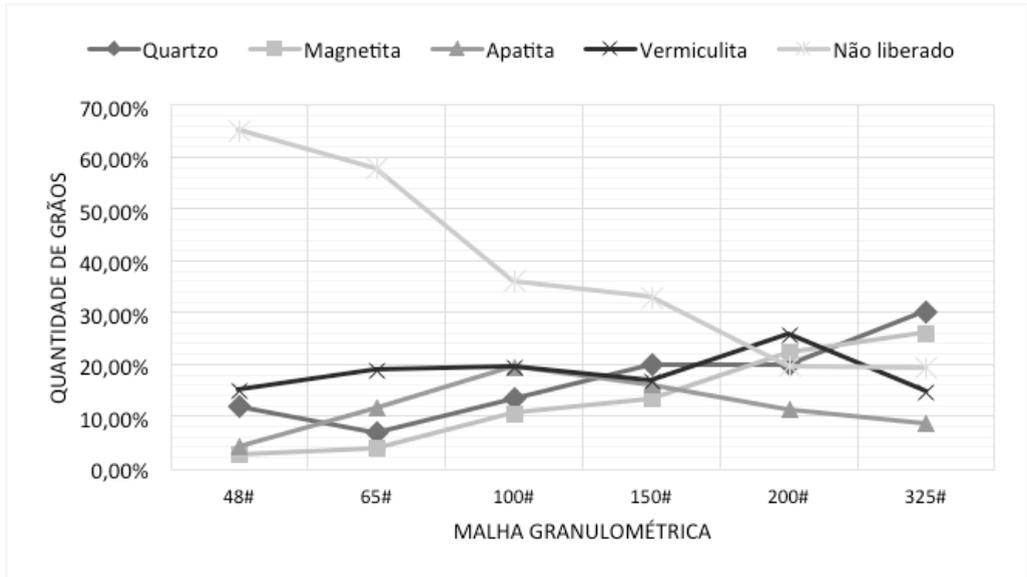


Gráfico 7 - Espectro de liberação com a contagem de diferentes tipos de grãos presentes na amostra.

As distribuições de grãos de quartzo e magnetita liberados se comportam de forma semelhante. As quantidades de ambos crescem de forma quase constante com a diminuição da faixa granulométrica, nota-se somente um pequeno decréscimo em quantidade de grãos liberados de quartzo presentes na faixa granulométrica de 48# em relação à faixa de 65#.

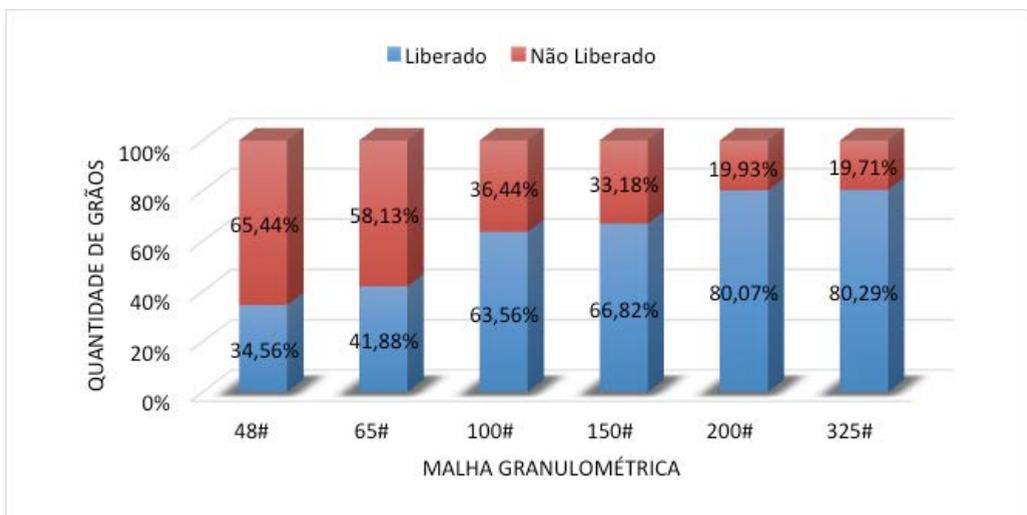


Gráfico 8 - Espectro de liberação com quantidades proporcionais de grãos liberados e não liberados.

Com relação ao gráfico acima, onde exibe-se as quantidades proporcionais de grãos liberados e grãos não liberados, nota-se que a quantidade de grãos não liberados é maior até a faixa de 65#, chegando a mais de 55% de grãos não liberados. Na malha de 48# observa-se aproximadamente 60% de grãos não liberados. Na menor malha, 325#, verifica-se uma quantidade de mais de 80% de grãos liberados. Lembrando que neste gráfico os grãos liberados estão todos reunidos e contabilizados em uma única categoria.

Nas faixas granulométricas de 200# e 325# observa-se que a proporção de grãos liberados se mantém constante em aproximadamente 80%. Pode-se concluir que o grau de liberação ideal dessa amostra estaria na faixa granulométrica de 200#, ou seja, entre 0,044 à 0,074 mm de diâmetro.

## **4. Conclusões**

conforme objetivos propostos neste trabalho e após as análises realizadas, conclui-se que a automação do método de Gaudin foi devidamente realizada, sendo possível a contagem dos grãos de forma mais rápida e com maior facilidade, permitindo assim determinar o grau de liberação. O grau de liberação dos grãos correspondeu a lógica de que quanto menor o grão mais liberado ele estará.

Além disso foi possível a mensuração do tamanho dos grãos, propiciando uma análise mais detalhada da distribuição dos grãos dentro de uma faixa granulométrica. Verificou-se que em algumas análises, devido a fatores como iluminação e qualidade de imagem adquirida, os grãos extrapolaram ou ficaram aquém dos limites das faixas granulométricas.

Portanto, os resultados mostraram que é perfeitamente possível a utilização da análise de imagem com o uso da ferramenta ImageJ em conjunto com os métodos de caracterização mineral com o intuito de baratear custos e dar maior velocidade aos ensaios laboratoriais, servindo também como dado comparativo, pois os resultados são bastante confiáveis. Ajustes no sistema de captura de imagem podem trazer resultados ainda mais válidos.

## **CHARACTERIZATION GRAIN AND AUTOMATION GAUDIN METHOD THROUGH IMAGE ANALYSIS USING IMAGEJ.**

**Abstract:** One goal of the use of any software in conjunction with laboratory techniques for mineral characterization is to facilitate and accelerate operations and, for many cases, make the detailed analysis. The public domain software ImageJ has been used in this paper as a tool for automation of the Gaudin's method processes, employing the techniques of image processing and analysis and also the use of plugins and applying filters to conduct a count of automated grain in order to determine the degree of liberation. Was verify also the efficiency of image analysis for the determination of parameters such as apparent diameter and sphericity of grains in samples of different particle sizes of apatite, in order to perform a more detailed analysis of each particle size range. The results showed that the smaller the grain size, the greater the degree of liberation, and also, that the size distribution of grains within each particle size range behaves close to a Gaussian distribution.

**Keywords:** degree of liberation; digital image analysis; ImageJ.

---

## **Referências bibliográficas**

ALBUQUERQUE, M. P. et al.. **ImageJ como ferramenta para medida da área de partículas de magnetita em três escalas manométricas.** In: 2º Congresso de Engenharia e Tecnologia - CET, Goiânia, 2012.

BARBERY, G.. Liberation 1, 2, 3: **Theoretical analysis of the effect of space dimension on mineral liberation by size reduction.** In: Minerals Engineering, Quebec, v. 5, n. 2, pp. 123 – 141, 1992.

GOMES, O. F. M.. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais.** 2001. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciências de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

LUZ, A. B. et al.. **Tratamento de Minérios.** 5ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

SAMPAIO, J.A., SILVA, F.A.N.G. **Determinação das densidades de sólido e de polpa.** In: SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A., BRAGA, P.F.A. (Eds.) Tratamento de minérios: Práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007, p. 35-51.

SCHNEIDER, C. L. et al.. **Parte II: Caracterização Tecnológica de Minérios.** In: Tratamento de Minérios. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, cap. 3, pp. 85 – 140.

WILLS, B. A. Wills. **Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** 7. ed. Oxford: Elsevier, 2006. 444 p.