

# RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE METAMORFISMO E DEFORMAÇÃO E AS CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM NA DEFINIÇÃO DA MALHA DE MOAGEM DE MINÉRIOS DE FERRO<sup>1</sup>

Rodrigo Fina Ferreira<sup>2</sup>  
Michelle Lacerda Salles Marques<sup>3</sup>  
Regisvander Gomes da Silva<sup>4</sup>  
Gizele Ferreira dos Santos<sup>4</sup>  
Elizorata Carvalho Pereira<sup>4</sup>

## Resumo

O minério de ferro lavrado atualmente no Brasil pode ser classificado em diversas tipologias litológicas com características composicionais, granulométricas, morfológicas e texturais bastante distintas. As rochas originais (protominérios) passaram por processos geológicos variados, que conferiram às mesmas tais propriedades. O avanço da mineração ao longo do tempo leva à escassez dos minérios naturalmente ricos, fazendo com que litologias mais pobres e contaminadas, além de rochas compactas, passem a ser lavradas. Há uma crescente tendência de aplicação de rotas de processo envolvendo moagem, sendo um dos objetivos desta operação unitária promover grau de liberação satisfatório às fases minerais, condição primordial para o bom desempenho das operações de concentração subsequentes. Diversos autores correlacionam os processos de metamorfismo e deformação das formações ferríferas às características mineralógicas, morfológicas e texturais observadas nos itabiritos e minérios de alto teor. O presente trabalho apresenta as implicações de tais propriedades resultantes destes processos geológicos na definição da malha de moagem. Realizou-se caracterização mineralógica e ensaios de moagem em laboratório com amostras provenientes de algumas regiões do Quadrilátero Ferrífero, verificando-se uma tendência de obtenção de grau de liberação satisfatório em malhas mais grossas para regiões que sofreram metamorfismo e deformação mais intensos.

**Palavras-chave:** Minério de ferro; Metamorfismo; Deformação; Mineralogia; Moagem.

## RELATIONSHIP BETWEEN METAMORPHISM AND STRAIN DEGREE AND THE FEATURES THAT INFLUENCE THE IRON ORE GRINDING SIZE DEFINITION

### Abstract

The iron ore mined today in Brazil can be classified into several lithological types which have distinct compositional, granulometrical, morphological and textural features. The original rocks passed through many geological processes which gave them such properties. The progress of mining over time leads to a scarcity of high grade iron ores, leading to the exploitation of poor, contaminated and compact ores. There is a trend of application of process flowsheets involving milling to promote mineral liberation. Several authors correlate the processes of banded iron formations strain and metamorphism to mineralogical, morphological and textural features observed in itabiritites and high grade ores. This paper presents the implications of such properties, result of geological processes, in defining the grinding size. We performed mineralogical characterization and batch grinding tests with samples from some regions of the Quadrilátero Ferrífero, in Minas Gerais State. There is a tendency of getting satisfactory liberation degree in coarser sizes for regions with higher metamorphism and strain degree.

**Key words:** Iron ore; Metamorphism; Strain; Mineralogy; Grinding.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Engenheiro de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, CPT, Vale, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Vale, Brasil.

<sup>4</sup> Técnico Mineralogista, Gerência de Desenvolvimento de Processo, CPT, Vale, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Itabiritos: Gênese e Alterações

As maiores fontes de minério de ferro atualmente conhecidas são provenientes das formações ferríferas bandadas (*banded iron formations* - BIFs), principalmente da fácies óxido, a qual será considerada no presente trabalho. Tais rochas, de acordo com as teorias mais aceitas, tiveram gênese relacionada a processos sedimentares químicos que deram origem inicialmente a uma rocha laminada, composta por variação rítmica entre lâminas predominantemente compostas por minerais ferrosos (hematita e/ou magnetita) e lâminas predominantemente compostas por sílica criptocristalina (chert/jaspe). O metamorfismo das formações ferríferas sedimentares dá origem aos chamados itabiritos,<sup>(1)</sup> ocorrendo a cristalização das fases amorfas, assim como mudanças texturais e morfológicas nos minerais. Os itabiritos podem ser subdivididos de acordo com diversos parâmetros, como composição mineralógica (itabirito silicoso, carbonático, anfíbolítico, manganífero etc.) e características granulométricas (itabiritos friáveis, semicompactos e compactos). Processos naturais de enriquecimento (tema ainda debatido entre os geólogos, tendo sido propostos diversos modelos que não serão aqui discutidos) concentraram naturalmente as formações ferríferas, originando os minérios de alto teor compostos essencialmente por óxidos de ferro e apresentando teores acima de 64% Fe.

Os protominérios do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, são itabiritos da Formação Cauê, Supergrupo Minas, formados pelo metamorfismo de uma “rocha laminada constituída de chert e óxido de ferro”.<sup>(2)</sup> A mineração inicialmente explorava apenas os minérios naturalmente ricos, porém a exaustão das reservas ao longo do tempo levou à necessidade de aproveitamento dos itabiritos, rochas mais pobres em Fe, com maior participação de SiO<sub>2</sub>. Atualmente são lavrados os itabiritos friáveis, que provêm do itabirito compacto por meio de intemperismo,<sup>(2)</sup> ou seja, sofreram abrandamento natural devido a processos superficiais. Diversos autores, como Dorr<sup>(2)</sup> e Biondi<sup>(3)</sup> acreditam que o principal processo responsável por tal abrandamento seria a lixiviação do quartzo a partir da rocha sã. Estudos tecnológicos estão sendo conduzidos visando o aproveitamento dos itabiritos compactos, rocha pouco alterada e que geralmente ocorre em maiores profundidades.

### 1.2 Grau de Metamorfismo e Deformação das Formações Ferríferas

Segundo Chemale Junior, Rosière e Endo,<sup>(4)</sup> o Quadrilátero Ferrífero foi submetido a pelo menos dois eventos principais de deformação e metamorfismo que alteraram significativamente as características estruturais e texturais das rochas. Foram estes eventos os responsáveis pela transformação das formações ferríferas sedimentares em itabiritos. Porém, a intensidade de metamorfismo e deformação não foi uniforme em toda a área do Quadrilátero, variando de acordo com as diferenças nos processos tectônicos e de acordo com o comportamento reológico das rochas. Rosière, Chemale Junior e Guimarães<sup>(5)</sup> afirmam que a intensidade do tectonismo diminui de leste para oeste, e dividem a região em dois domínios principais: um domínio de alta deformação (no qual as estruturas associadas ao segundo evento de deformação são predominantes), e um domínio de baixa deformação, no qual ainda se pode ter acesso a estruturas diagenéticas. Pires<sup>(6)</sup> propõe a subdivisão do Quadrilátero em quatro zonas metamórficas: Zona da Grunerita (ZG), Zona da

Cummingtonita (ZC), Zona da Actinolita (ZA) e Zona da Tremolita-Antofilita (ZTA), sendo que o grau metamórfico aumenta da primeira para a última. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do Quadrilátero dividido nos domínios citados acima. Conforme concluem Rosière e Chemale Junior,<sup>(7)</sup> observa-se que o gradiente deformacional acompanha o zonamento metamórfico.

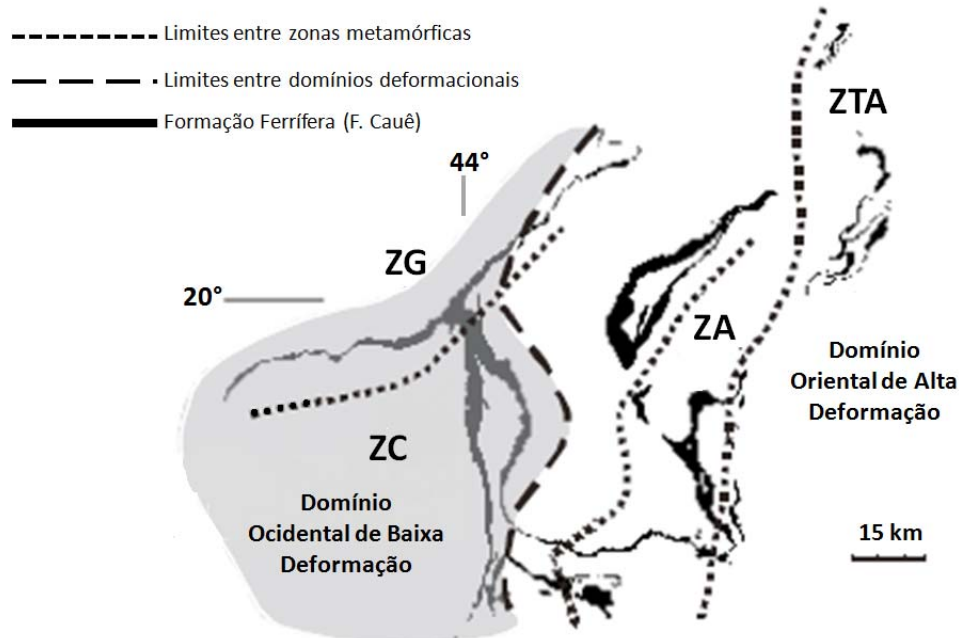


Figura 1. Domínios deformacionais e zonas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero.<sup>(7)</sup>

Os processos metamórficos e deformacionais acarretam transformações em diversas características dos minerais, sendo uma delas de especial interesse para os processos de cominuição e concentração: o tamanho dos cristais. Segundo Rosière,<sup>(8)</sup> o aumento do grau de metamorfismo contribui para um aumento generalizado no tamanho dos cristais resultando em minérios mais grosseiros. James,<sup>(9)</sup> *apud* Dorr,<sup>(2)</sup> afirma que o tamanho dos grãos de quartzo e hematita varia sistematicamente com o grau de metamorfismo. James e Dorr (*apud* Klein 1973)<sup>(10)</sup> definiram o grau metamórfico das formações ferríferas através das dimensões médias dos cristais de quartzo. Assim sendo, considerando-se a divisão do Quadrilátero Ferrífero com relação ao grau de metamorfismo e deformação, espera-se certa variação na granulação dos cristais entre os depósitos situados nas diferentes zonas e domínios.

Deve-se salientar, entretanto, que esta análise considera uma visão bastante geral e ampla do Quadrilátero. Eventos tectônicos localizados, como zonas de cisalhamento e dobramentos, podem fazer com que a granulação dos cristais apresente variação, mesmo que menos significativa, em áreas menores.

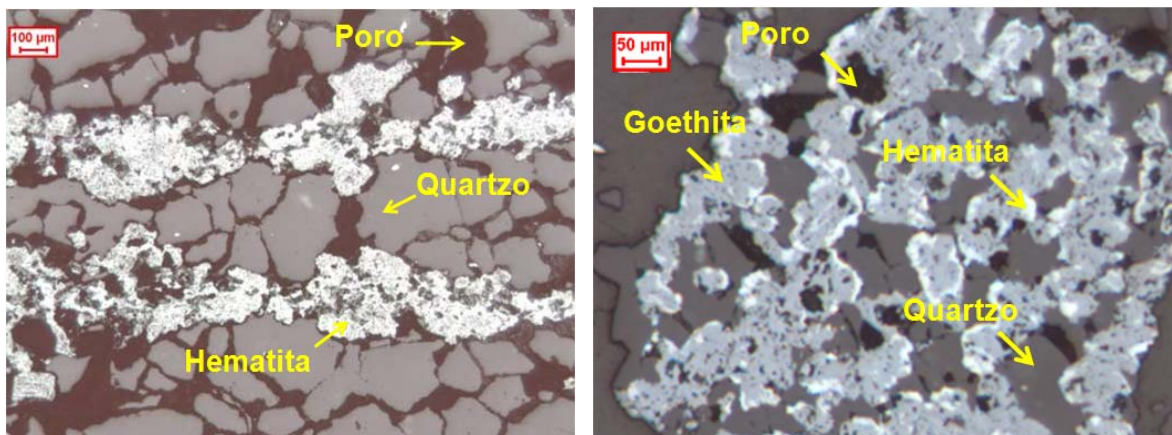
### 1.3 Características que Influenciam na Definição da Malha de Moagem

A obtenção de produtos economicamente aproveitáveis a partir dos itabiritos passa necessariamente por processos de cominuição fina, como a moagem, objetivando-se a individualização das fases minerais para posterior processo de concentração, e para tal deve-se definir por meio da caracterização tecnológica a malha granulométrica na qual se obtém liberação satisfatória dos minerais minérios

e da ganga. Caso esta condição não seja atendida, a seletividade do processo de concentração fica comprometida. Cabe lembrar a definição de Gaudin<sup>(11)</sup> para o grau de liberação de um determinado mineral, segundo a qual este termo se refere à percentagem do mineral que ocorre como partículas livres em relação ao total que ocorre como partículas mistas e livres. Atendo-se à moagem como processo através do qual se obtém a individualização das fases minerais a partir de partículas poliminerálicas (ao menos em grau suficiente para a concentração), podemos citar as duas possibilidades de aumento do grau de liberação através de cominuição, segundo Gaudin:<sup>(11)</sup>

- liberação por destacamento: se as propriedades físicas de minerais adjacentes em uma partícula são suficientemente distintas, ou caso a ligação entre os mesmos for relativamente fraca com relação a cada mineral, as fraturas resultantes da cominuição podem ocorrer preferencialmente nas bordas dos cristais. Verifica-se na prática que algumas feições referentes à textura das rochas e ao arranjo dos cristais podem facilitar a liberação dos cristais por destacamento, não sendo necessário se atingir o tamanho dos mesmos (Figura 2). Gaudin<sup>(11)</sup> cita as rochas intemperizadas como exemplo de materiais que podem sofrer liberação por destacamento, sendo este o caso dos itabiritos friáveis, cujo quartzo teria sido parcialmente lixiviado por agentes supergênicos gerando maior porosidade entre os cristais, reduzindo a coesão entre os mesmos;
- liberação por redução de tamanho: dependendo das características dos minerais, as fraturas podem ocorrer no interior dos cristais, e não nas bordas, sendo que após a cominuição ainda podem remanescer partículas mistas. Neste caso deve-se reduzir o tamanho das partículas ao tamanho dos menores cristais presentes. No caso dos itabiritos compactos, pouco porosos, este pode ser o mecanismo preponderante (Figura 2). No caso da necessidade de liberação por redução de tamanho, a principal característica intrínseca ao minério que deve ser considerada para se definir uma malha de moagem adequada a fornecer a liberação das fases minerais é o tamanho dos cristais.

A predominância entre estes dois mecanismos na cominuição de um determinado minério vai depender das características dos minerais (dureza, tenacidade, clivabilidade) e das partículas como um todo (coesão entre cristais, textura, porosidade, bandamento, xistosidade, presença de zonas de fraqueza).



**Figura 2.** Partícula com tendência a liberação por destacamento (esquerda). Partícula com tendência a liberação por redução de tamanho (direita).

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo comparar o grau de liberação do quartzo obtido após moagem em uma determinada malha granulométrica de duas amostras de itabirito compacto provenientes de áreas do Quadrilátero Ferrífero submetidas a diferentes graus de metamorfismo e deformação. A partir destes dados, pode-se verificar a relação entre o grau metamórfico e deformacional e as características intrínsecas ao minério que influenciam na definição da malha de moagem adequada à individualização das fases minerais.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram caracterizadas duas amostras de furos de sonda de itabirito compacto, provenientes de duas zonas de metamorfismo do Quadrilátero Ferrífero: zona da grunerita (menor grau metamórfico, Amostra BG), e zona da tremolita-antofilita (maior grau metamórfico, Amostra AG). Representa-se, portanto, as zonas de menor e maior grau metamórfico. Optou-se por estudar os itabiritos compactos por serem rochas menos alteradas por processos superficiais.

Realizou-se caracterização química das mesmas, sendo os elementos e compostos Fe, SiO<sub>2</sub>, P, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn, TiO<sub>2</sub>, CaO e MgO analisados via fluorescência de raios X, e o PPC determinado via gravimetria. Tais análises foram efetuadas pela Gerência de Laboratórios da Vale.

Realizaram-se ensaios de moagem em moinho de jarro com diâmetro de 8" e comprimento de 12", com carga de bolas distribuída em 38,1 mm (11,007 kg); 25,4 mm (3,430 kg); 19,1 mm (1,527 kg) e 12,7 mm (0,913 kg), e polpa a 65% de sólidos. O minério foi inicialmente britado a 2,0 mm para efeito de adequação às dimensões do moinho. Aplicou-se rotação de 72 RPM. As amostras foram moídas até se atingir aproximadamente 95% passante na malha de 0,150 mm.

O produto moído foi analisado via microscopia ótica de luz refletida para quantificação da composição mineralógica e determinação do grau de liberação. As fotomicrografias foram obtidas através de analisador de imagem Leica DM 6000 M acoplado ao *software* QWin. Os ensaios tecnológicos, assim como a caracterização mineralógica, foram efetuados no Centro de Pesquisas Tecnológicas (CPT) da Vale.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados da quantificação mineralógica e da análise química das amostras.

**Tabela 1.** Caracterização mineralógica e química

Amostra	Quantificação Mineralógica (%)												
	Hematita Especular	Hematita Lamelar	Hematita Granular	Hematita Sinuosa	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo	Manganês	Caulinita	Gibbsita	Outros
<b>BG</b>	0,00	0,00	0,00	0,43	13,42	19,95	12,73	0,19	53,09	0,12	0,00	0,08	0,00
<b>AG</b>	10,04	5,26	24,55	0,00	2,86	1,60	0,00	2,15	53,17	0,03	0,00	0,04	0,30

Amostra	Análise Química (%)								
	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
<b>BG</b>	30,47	54,82	0,052	0,39	0,152	0,007	0,015	0,068	1,76
<b>AG</b>	31,85	53,32	0,009	0,46	0,024	0,009	0,039	0,001	0,15

Verifica-se que as amostras são muito semelhantes quimicamente, sendo o principal deletério a sílica, e são consideravelmente pobres em Fe quando comparadas aos minérios ricos do Quadrilátero Ferrífero. Com relação aos minerais ferrosos a amostra BG apresenta distribuição em percentuais próximos entre hematita, goethita e magnetita, sendo esta última predominante. Já a amostra AG é essencialmente hematítica. Para ambas o principal mineral contaminante é o quartzo que representa mais de 50% da composição mineralógica, sendo que minerais manganésíferos e gibbsita ocorrem como traços. As fotomicrografias contidas na Figura 3 apresentam as características morfológicas e texturais das amostras, assim como as formas de associação entre quartzo e minerais ferrosos. As mesmas foram obtidas a partir do ROM.

Observa-se, pelas imagens, que o tamanho dos cristais de quartzo e hematita tende a aumentar significativamente da amostra BG para a amostra AG, ou seja, de acordo com o aumento do grau de metamorfismo ao qual a amostra foi submetida, o que está plenamente de acordo com os autores previamente citados. Verifica-se, também, que não ocorrem zonas de fraqueza nas partículas de ambas as amostras.

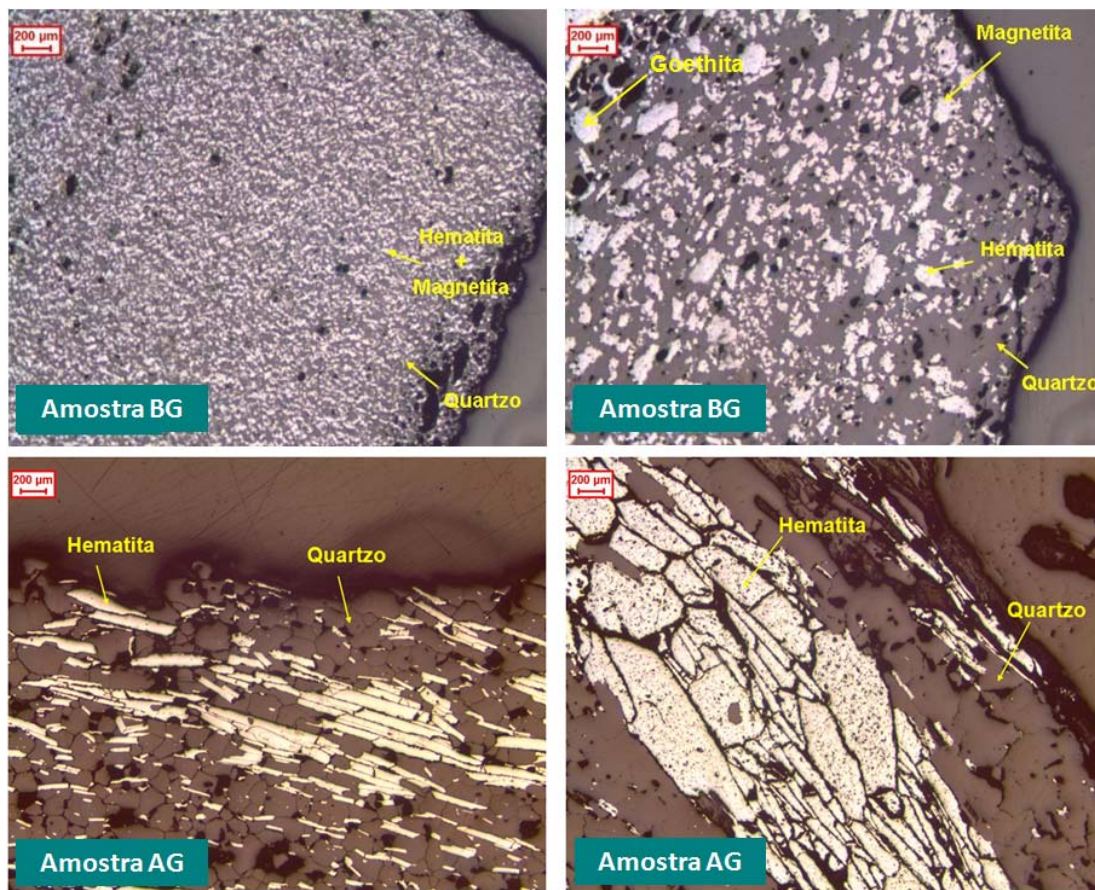
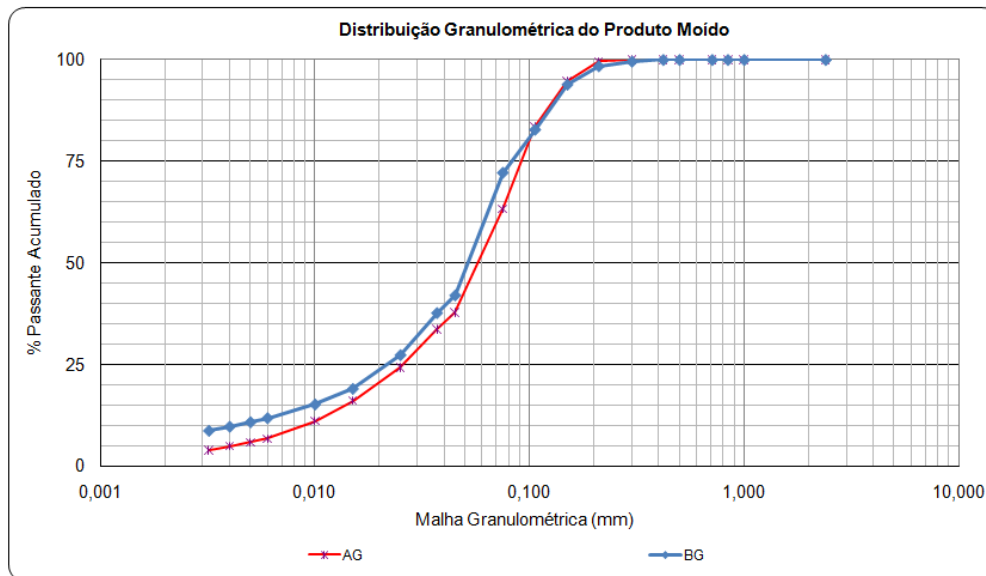


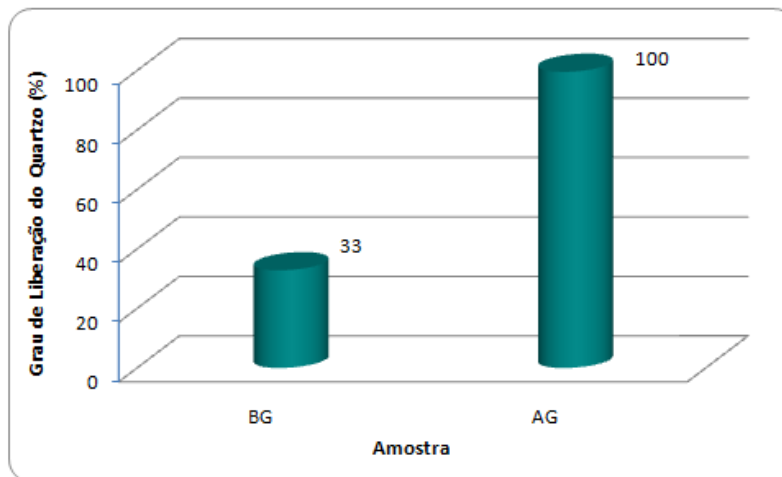
Figura 3. Fotomicrografias. Microscópio óptico de luz refletida. Nicóis paralelos.

A Figura 4 apresenta as curvas de distribuição granulométrica das amostras após moagem com malha de controle em 0,150 mm (P95).



**Figura 4.** Distribuição granulométrica após moagem.

Verifica-se que as amostras apresentam distribuições granulométricas bastante similares, principalmente nas frações mais grossas. A amostra BG encontra-se ligeiramente mais fina nas frações inferiores a 0,100 mm. Esta análise é importante, pois desta forma a comparação do grau de liberação será efetuada para partículas com distribuições de tamanho próximas. Foi quantificado após a moagem o grau de liberação do quartzo, tendo sido obtidos os resultados apresentados no gráfico da Figura 3.



**Figura 3 –** Grau de liberação do quartzo no produto moído.

Obteve-se maior grau de liberação para a amostra AG, proveniente da zona de maior grau metamórfico e deformacional do Quadrilátero Ferrífero, e menor grau de liberação para a amostra proveniente da zona de menor grau metamórfico (amostra BG). Existe, portanto, uma correlação entre o grau de metamorfismo e o grau de liberação do quartzo na malha de moagem estudada, e atribui-se este fato principalmente à diferença na granulação dos cristais, variável com o grau de metamorfismo e deformação.

Caso as amostras estudadas fossem submetidas a um processo de concentração após moagem na malha de 0,150 mm, não seria possível a obtenção de qualidade no concentrado da amostra BG, sendo que as partículas mistas tenderiam a ser direcionadas a este fluxo, contaminando-o. Esta amostra deve ser cominuída em granulometria mais fina para se elevar o grau de liberação, e cabe salientar que a aplicação de moagem em malhas mais finas implica em maior consumo energético nesta operação, e em maior geração de partículas ultrafinas. Já a amostra AG encontra-se com as fases minerais completamente individualizadas, situação favorável à concentração.

Na amostra BG, os cristais de quartzo que permaneceram associados a minerais ferrosos mesmo após a moagem apresentam granulação média de 0,030 mm, com menor granulação em 0,006 mm.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que existe uma tendência de obtenção de liberação adequada das fases minerais em malhas mais grossas para itabiritos compactos provenientes de zonas de maior grau de metamorfismo, no domínio de alta deformação do Quadrilátero Ferrífero, sendo que estes apresentam cristais maiores que os itabiritos provenientes das zonas de menor grau, situadas no domínio de baixa deformação, sendo esta característica preponderante na definição da malha de moagem para rochas compactas.

No entanto, é importante ressaltar que esta análise leva em consideração um modelo geológico amplo do Quadrilátero Ferrífero, que considera uma tendência abrangente de variação de tamanho de cristais com o grau de metamorfismo e deformação. Fenômenos tectônicos localizados, como zonas de cisalhamento e dobras, podem fazer com que haja variação da granulação, mesmo que menos significativa, dentro de pequenas áreas. Pretende-se dar continuidade ao estudo adicionando-se um maior número de amostras, acrescentando a análise das demais zonas metamórficas não avaliadas no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 ESCHWEGE, W. L. v. Pluto Brasiliensis. Berlin : Verlag G. Reimer, 1833.
- 2 DORR, J.V.N. Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero de MG. In: DNPM-USGS. Publicação Especial 1, 1959.
- 3 BIONDI, J.C. Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- 4 CHEMALE JR., F.; ROSIÈRE, C.A.; & ENDO, I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Um Modelo. Pesquisas UFRGS, Porto Alegre, 18 (2): p. 104 – 127. 1991.
- 5 ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; & GUIMARÃES, M.L.V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização. Geonomos, 1(1): p. 65-84. 1993.
- 6 PIRES, F.R.M. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 67 (1), p. 77-105. 1995.
- 7 ROSIÈRE C. A.; CHEMALE JR., F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. Geonomos, 8(2): p. 27-43. 2000.
- 8 ROSIÈRE, C. A. Um modelo para evolução microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II - Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética. Geonomos, v.4, n.1, p.61-75, 1996.



- 9 JAMES H. L. Zones of regional metamorphism in the Precambrian of northern Michigan: Bull., G.S.A., v.66, n12, part I. 1955.
- 10 KLEIN, C.; JAMES, H.L.;SIMS, P.K.;GOODWIN, A.M.;BAYLEY, R.W.; BEUKES, N.J.; DORR II, J.V.N.; TRENDALL, A.F.; ALEXANDROV, E.A.; FRENCH, B.M.; LA BERGE, G.L.; PERRY JR., E.C.; TAN, F.C.; MOREY, G.B. Precambrian Iron-formations of the World. Economic Geology, 68 (7), p.913-1117. 1973.
- 11 GAUDIN, A.M. Principles of Mineral Dressing. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, 1939.