

COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E MINERALÓGICAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM FAIXAS ULTRAFINAS PROVENIENTES DE DIFERENTES DEPÓSITOS E ROTAS DE BENEFICIAMENTO

N. L. Zinato

Mestranda em Engenharia de Materiais - REDEMAT/UFOP

Rua João Júlio Gonçalves, 155, Antônio Dias, Ouro Preto/ MG. CEP: 35400-000

natalialzinato@hotmail.com

RESUMO

O trabalho apresenta a caracterização de rejeitos de minério de ferro descartados na flotação, separação magnética e underflow do espessamento de lammas, para a identificação das faixas granulométricas mais ricas em ferro. A classificação por cyclosizer revelou que maior parte do rejeito da flotação foi retida entre 6,69 e 32,13 μ m, da separação magnética abaixo de 4,11 μ m e do underflow abaixo de 4,02 μ m. A FRX demonstrou que o rejeito da flotação e separação magnética são constituídos essencialmente por SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ e do underflow por SiO₂ e Fe₂O₃. O DRX revelou que a amostra da flotação é composta por hematita, quartzo, caulinita e talco, da separação magnética por quartzo, goethita, caulinita e romboclasio e do underflow por quartzo, hematita e goethita. Pelas análises de liberação e mineralogia, concluiu-se que os rejeitos possuem alto teor de ferro e baseado nisso e em demais estudos externos, foram sugeridas rotas para seu reaproveitamento.

Palavras-chave: rejeito de minério de ferro, caracterização, reaproveitamento.

INTRODUÇÃO

O setor da mineração é indispensável no cotidiano moderno e constitui um dos pilares do desenvolvimento tecnológico atual. A atividade mineradora, no entanto,

existe desde os primórdios da sociedade. Os povos antigos já extraíam minerais das rochas e do solo para produzir utensílios, armas, ferramentas e pigmentos. Com o passar do tempo, foram desenvolvendo-se novas aplicações para os minerais e como consequência, surgiram diversas minas de exploração.

No Brasil, a partir do século XVII, a mineração passou a dominar a economia através da extração de ouro e diamante. Principal produtor, o estado de Minas Gerais sofreu consequências diretas, tais como o enorme crescimento populacional e a ocupação desordenada das cidades. Hoje, um dos minerais mais extraídos no país é o minério de ferro, lucrativo produto de exportação e largamente utilizado no consumo interno. Porém, tanto no Brasil, como na maioria dos países emergentes, o ritmo crescente da exploração destes recursos naturais vem agravando os impactos causados no meio ambiente.

Atualmente, com a crescente discussão sobre os danos causados pelas atividades humanas na natureza, surgiu a preocupação em estabelecer o desenvolvimento sustentável da economia, através da utilização consciente dos recursos naturais e da redução dos resíduos gerados e descartados pelas indústrias. No setor da extração mineral, as grandes preocupações são a respeito do esgotamento das reservas e da forma correta de deposição dos resíduos gerados durante os processos de extração e beneficiamento.

A extração de minério bruto, assim como seu beneficiamento gera uma grande quantidade de resíduos que são descartados em barragens e bacias de contenção, o que constitui um risco eminente ao ecossistema da região. Um agravante deste processo é que o teor do mineral presente na jazida interfere na quantidade de rejeito e quanto menor a sua porcentagem, maior é a quantidade de rejeito produzido. Também deve-se considerar que a baixa eficiência nos processos de recuperação é responsável pela produção de um rejeito rico em ferro, que evidentemente tem um valor econômico agregado.

Uma vez conhecida a composição desse rejeito, torna-se possível a realização de estudos a fim de buscar um reaproveitamento neste ou em outros setores da economia. Sob esta perspectiva, é importante a realização de uma caracterização dos rejeitos para identificar em quais faixas granulométricas existe uma maior concentração de ferro que possa ser recuperado para futuras aplicações bem como identificar em qual rota de beneficiamento foram gerados.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho consistiu na determinação das características mineralógicas, químicas, granulométricas e macroestruturais de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro, para subsidiar métodos de sua redução e/ou aproveitamento. Para tanto, foram utilizadas as técnicas de classificação granulométrica por peneiramento a úmido e cyclosizer, análise química por titulação e Fluorescência de Raios X (FRX), análise estrutural por Difractometria de Raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura com análise mineralógica integrada (MEV-AMI) e análise mineralógica por microscopia óptica (MO).

Materiais

Os materiais caracterizados consistiram de rejeitos sólidos originados em processos de beneficiamento de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais. Foram utilizadas amostras de rejeito produzidas nas etapas de separação magnética, flotação e no underflow do espessador de lama.

Métodos

Inicialmente o material foi submetido a uma separação por faixa granulométrica, pelo peneiramento a úmido, com uma série de peneiras nas aberturas de 0,150, 0,106, 0,075, 0,053 e 0,045mm. Antes, porém, as amostras passaram por secagem, pulverização, homogeneização e quarteamento.

Os materiais abaixo de 45µm foram submetidos à classificação por cyclosizer. O equipamento consiste de um conjunto de hidrociclones ligados em série, ajustados para faixas de granulometrias consecutivamente menores. Além disso, outros componentes completam o circuito: um rotâmetro com escala em l/h, uma bomba d'água monobloco, reservatório de água para alimentação do sistema, manômetro montado na tubulação de descarga da bomba, temporizador com alarme, termômetro para determinação da temperatura da água do reservatório e um dispositivo de controle do tempo. O conjunto é utilizado na determinação da distribuição granulométrica de amostras de minérios, na faixa de aproximadamente 10 a 50µm, para materiais com densidade similar à do quartzo ($2,7\text{g/cm}^3$)⁽²⁾.

Neste equipamento, a amostra sólida suspensa em água foi inserida em um recipiente, e posteriormente introduzida no primeiro ciclone, através da abertura de alimentação. A fração grossa resultante em cada ciclone foi armazenada em pequenos recipientes localizados acima de cada hidrociclone. A fração fina foi descarregada pela saída (vortex) do ciclone, que alimentou o seguinte, e assim por diante, até o quinto e último ciclone. Foram geradas 7 frações de cada amostra, referentes as quantidades retidas no peneiramento, e nos ciclones de 1 a 5, além da massa passante do cyclosizer.

As amostras separadas granulometricamente foram submetidas, na forma de pó, à difratometria de raios X (DRX), para sua caracterização estrutural. Por meio da análise das posições angulares dos picos de difração e das intensidades relativas destes picos foi possível determinar sua estrutura cristalina e identificar os minerais e fases presentes.

A análise mineralógica foi realizada a partir de observações feitas com o microscópio óptico de luz refletida. As amostras foram observadas em um microscópio óptico, com lentes objetivas de 10X. Seguindo, previamente, o método usual de montagem de amostras minerais em grãos para a observação nesse tipo de equipamento, a superfície das amostras foram varridas pela lente e posteriormente realizada a contagem dos minerais para determinação quantitativa dos minerais presentes. Os contrastes observados na amostra são referentes a diferentes refletividades relativas intrínsecas a cada elemento. A microestrutura é revelada por um ataque químico na superfície, feito com um reagente químico apropriado. A orientação cristalográfica de alguns materiais monofásicos é responsável pela reatividade química de seus grãos. A consequência disso é que em uma amostra policristalina, as características reveladas pelo ataque químico variam de grão para grão (3).

O Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios X é um acessório que, quando acoplado ao MEV-AMI, permite uma identificação mineral pontual da amostra, bem como o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais presentes, possibilitando a geração de mapas composicionais de elementos. O uso do EDS acoplado ao MEV-AMI auxilia na observação direta de bordas ou contornos de grãos, sessões polidas, além de auxiliar na caracterização inter e intragranular para partículas relativamente grandes, o que permite, por exemplo, prever o comportamento estrutural do minério nas diversas etapas do seu beneficiamento e

processamento industrial (4). O MEV-AMI foi utilizado na coleta de informações morfológicas dos materiais e na análise do grau de liberação. Para tanto, não foi necessário considerar frações de diferentes granulometrias nesta etapa, sendo então utilizadas apenas amostras globais dos 3 rejeitos estudados.

A análise química das amostras foi realizada em duas etapas distintas, levando-se em consideração as faixas granulométricas que as compõe. A fluorescência de raios X determinou de forma qualitativa e semi-quantitativa os componentes químicos presentes, enquanto que a análise por titulação determinou de forma quantitativa. Por fornecer resultados mais precisos, foram consideradas apenas as quantificações referentes à análise química.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Classificação granulométrica

As três amostras foram submetidas ao peneiramento a úmido e classificadas com granulometria superior (retido) e inferior (passante) a 45µm. Os dados estão dispostos na figura 1 em porcentagem da massa total peneirada.

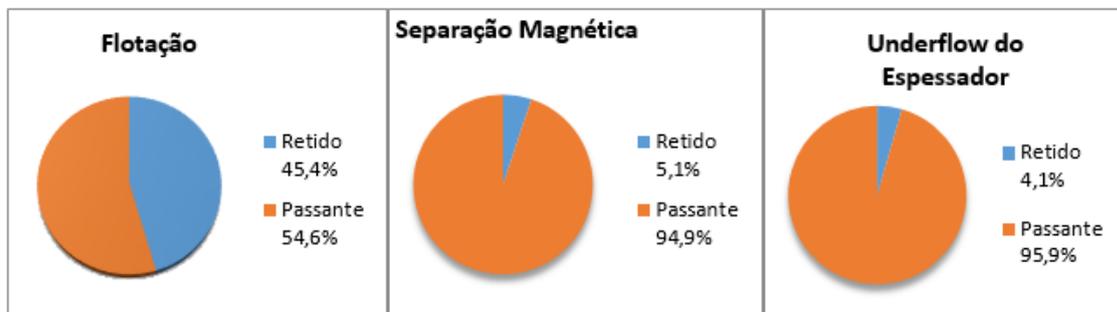


Figura 1: Porcentagem de massa retida no peneiramento, com granulometria acima de 45µm. Rejeitos da flotação, da separação magnética e do underflow do

Observou-se que a maior parte dos rejeitos é composta por grãos com dimensões inferiores a 45µm. Menos da metade dos grãos que compõe a amostra da flotação foi retida pelo peneiramento. Nas amostras da separação magnética e do underflow do espessador de lama as porcentagens retidas foram ainda menores, entre 4 e 5%.

Pelo cyclosizer foram classificadas as massas passantes da etapa anterior, 415,1g do rejeito da flotação, 641,29g do rejeito da separação magnética e 605,0g do rejeito do underflow do espessador. Os resultados estão dispostos na tabela I.

Tabela I: Classificação granulométrica via cyclosizer

	FLOTAÇÃO		SEP. MAGNÉTICA		UNDERFLOW E.	
	Densidade: 3,859g/cm ³ Temperatura média Inicial: 20,55°C / Final: 20,58°C		Densidade: 4,233g/cm ³ Temperatura média Inicial: 19,51°C / Final: 19,57°C		Densidade: 4,327g/cm ³ Temperatura média Inicial: 19,98°C / Final: 19,04°C	
	Granulometria	Massa Retida	Granulometria	Massa Retida	Granulometria	Massa Retida
Ciclone 1	32,13µm	77,22g	30,32µm	24,53g	29,63µm	24,98g
Ciclone 2	20,18µm	106,51g	19,04µm	32,62g	18,61µm	13,77g
Ciclone 3	14,35µm	113,64g	14,01µm	63,31g	13,70µm	25,20g
Ciclone 4	6,69µm	56,24g	6,31µm	71,90g	6,17µm	27,73g
Ciclone 5	4,36µm	20,19g	4,11µm	71,31g	4,02µm	42,15g
Passante	<4,36µm	5,83g	<4,11µm	377,62g	<4,02µm	471,17g

Análise química

A análise química quantitativa por fluorescência de raios X identificou os elementos presentes nas amostras. Os dados estão dispostos na tabela II.

Tabela II: Análise química por fluorescência de raios X

REJEITO DA FLOTAÇÃO										
Amostra	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	Ag ₂ O	CuO	CaO	ZnO	SrO	Al ₂ O ₃
Retido	92,725%	5,762%	1,461%	0,031%	0,020%	-	-	-	-	-
Ciclone 1	35,910%	62,233%	1,585%	0,273%	-	-	-	-	-	-
Ciclone 2	31,376%	67,224%	1,209%	0,191%	-	-	-	-	-	-
Ciclone 3	37,978%	60,443%	1,310%	0,245%	-	0,024%	-	-	-	-
Ciclone 4	20,481%	77,903%	1,346%	0,270%	-	-	-	-	-	-
Ciclone 5	13,504%	79,767%	0,9015%	0,409%	-	-	0,125%	-	-	-
Passante	18,336%	55,015%	1,208%	2,069%	-	-	0,076%	0,020%	0,009%	23,267%
REJEITO DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA										
Amostra	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	CaO	K ₂ O	CuO	ZnO	SrO	Al ₂ O ₃
Retido	70,801%	26,653%	1,789%	0,388%	0,370%	-	-	-	-	-
Ciclone 1	36,174%	62,034%	1,176%	0,480%	0,136%	-	-	-	-	-
Ciclone 2	10,569%	87,427%	1,514%	0,404%	0,087%	-	-	-	-	-
Ciclone 3	17,818%	80,460%	1,144%	0,409%	0,169%	-	-	-	-	-
Ciclone 4	11,403%	86,544%	1,380%	0,436%	0,236%	-	-	-	-	-
Ciclone 5	11,708%	86,118%	1,193%	0,600%	0,380%	-	-	-	-	-
Passante	18,778%	48,319%	0,767%	4,164%	0,306%	0,117%	0,029%	0,038%	0,020%	27,450%
REJEITO DO UNDERFLOW DO ESPESSADOR										
Amostra	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	CaO	ZnO	PdO	Al ₂ O ₃		
Retido	68,527%	29,921%	1,347%	0,056%	0,099%	0,021%	0,029%	-		
Ciclone 1	23,490%	66,972%	1,111%	0,172%	-	-	-	8,255%		
Ciclone 2	44,404%	54,115%	1,362%	0,119%	-	-	-	-		
Ciclone 3	36,933%	61,594%	1,369%	0,104%	-	-	-	-		
Ciclone 4	29,341%	68,960%	0,622%	0,077%	-	-	-	-		
Ciclone 5	9,690%	88,871%	1,336%	0,103%	-	-	-	-		
Passante	16,942%	71,701%	1,232%	0,245%	-	-	-	9,880%		

Por meio da análise química por titulação foi possível determinar quantitativamente a composição das amostras em termos da concentração de Fe e SiO₂ (e outros resíduos insolúveis). Os resultados estão dispostos na tabela III.

Tabela III: Análise química por titulação

AMOSTRA		RETIDO PEN.	CICLONE 1	CICLONE 2	CICLONE 3	CICLONE 4	CICLONE 5	PASSANTE
FLOTAÇÃO	MALHA	>32,13µm	32,13µm	20,18µm	14,35µm	6,69µm	4,36µm	<4,36µm
	%SiO ₂	91,8	29,3	53,3	42,8	22,3	14,8	15,3
	%Fe	4,7	48,7	30,7	39,8	52,6	56,4	48,2
SEP. MAG.	MALHA	>30,32µm	30,32µm	19,04µm	14,01µm	6,31µm	4,11µm	<4,11µm
	%SiO ₂	61,3	22,3	35,9	26,4	17,7	12,7	22,5
	%Fe	25,8	52,5	42,8	48,5	55,2	56,9	36,6
UNDERFLOW	MALHA	>29,63µm	29,63µm	18,61µm	13,70µm	6,17µm	4,02µm	<4,02µm
	%SiO ₂	51,8	20,2	30,4	28,4	23,8	21,6	15,1
	%Fe	29,3	50,3	41,0	47,7	51,0	52,1	51,5

Os gráficos da figura 2 mostram a comparação entre os teores de SiO₂ e Fe contidos em cada amostra de acordo com a distribuição granulométrica.

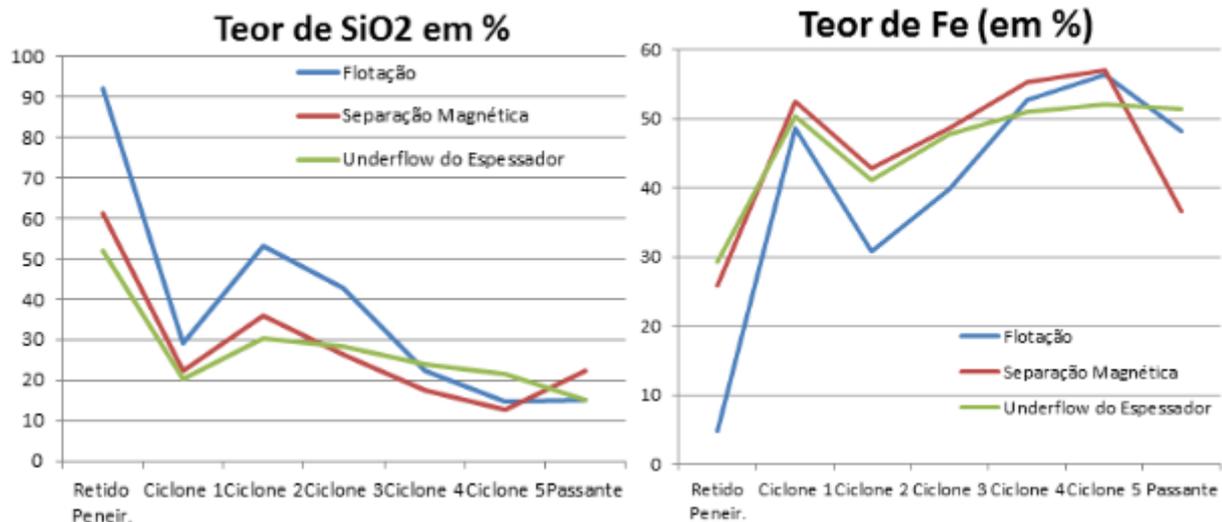


Figura 2: Comparação dos teores de SiO₂ e de Fe (em %) contidos nas três amostras por faixa granulométrica

Observou-se uma relação inversamente proporcional entre os teores de SiO₂ e Fe. Além disso, foi possível verificar que as faixas de maior granulometria contém maior concentração de SiO₂, enquanto que o Fe está presente em concentrações mais elevadas nas porções retidas pelos ciclones 4 e 5. Nota-se ainda outro pico de menor concentração nas porções retida pelo ciclone 1

Análise mineralógica

A difratometria de raios X do rejeito da flotação identificou padrões referentes aos minerais de quartzo, hematita, caulinita e talco, como mostra a figura 3.

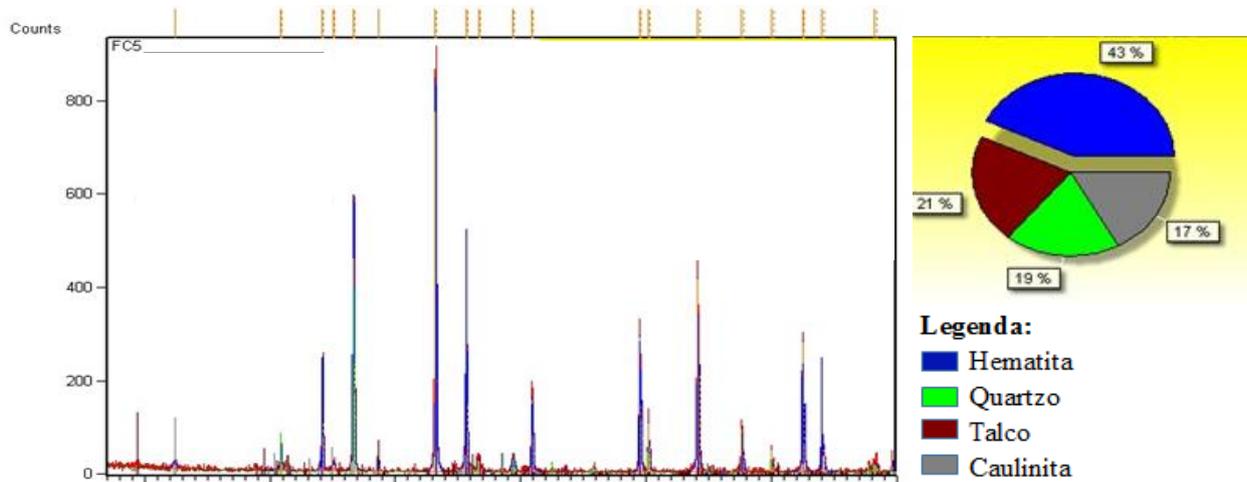


Figura 3: Difratoograma de raios X do rejeito da flotação

No rejeito da separação magnética foram identificados padrões de difração referentes ao quartzo, goethita, caulinita e Romboclásio, como mostra a figura 4.

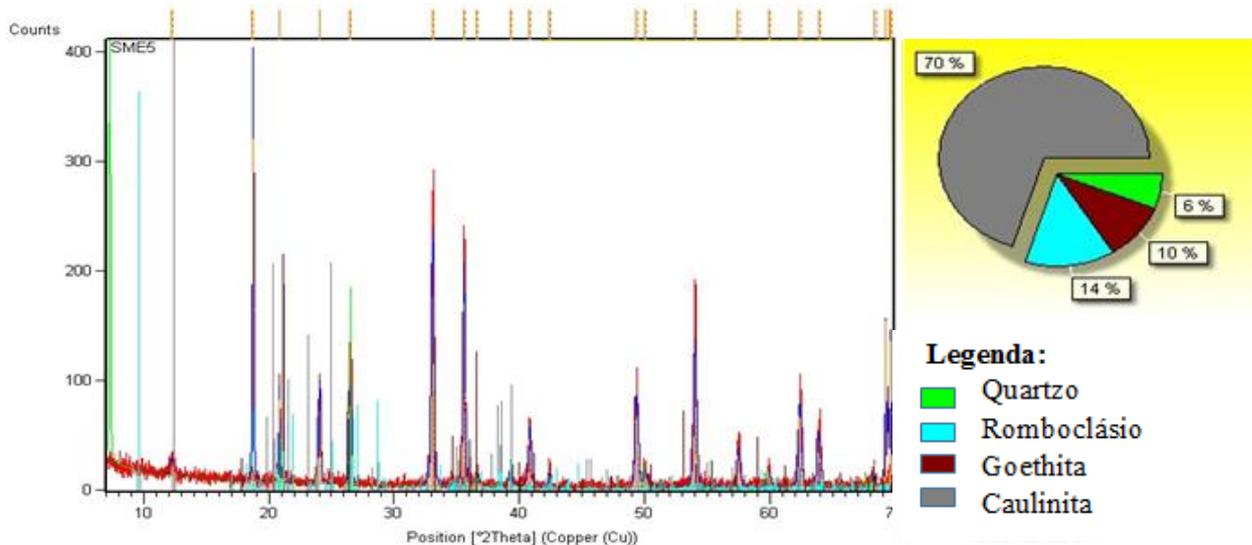


Figura 4: Difratoograma de raios X do rejeito da separação magnética

No rejeito do underflow do espessador foram identificados padrões de difração referentes ao quartzo, goethita e hematita, como mostra a figura 5.

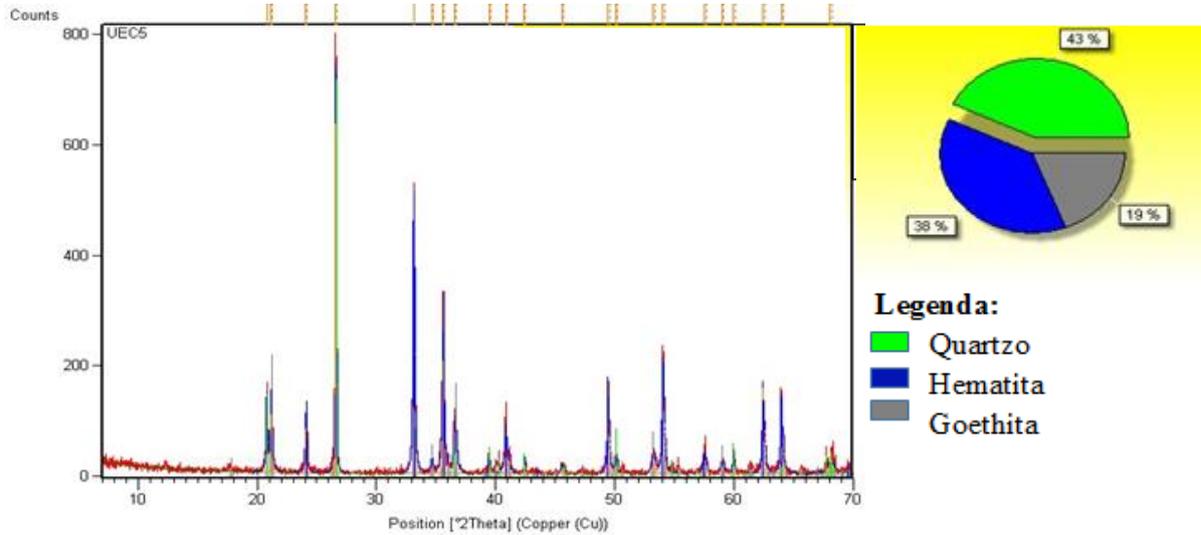


Figura 5: Difratoograma de raios X do rejeito do underflow do espessador

Por meio da minerografia quantitativa volumétrica das amostras da flotação constatou-se que a mineralogia da amostra é essencialmente constituída por hematita tubular monocristalina (58,28%), quartzo (30,51%) e hematita tabular policristalina (7,37%), como mostra a tabela IV. O rejeito da separação magnética é composto essencialmente pelos minerais hematita tabular monocristalina (68,32%), hematita tabular policristalina (12,14%), quartzo (11,12%) e goethita (6,68%) e do underflow do espessador por minerais de Goethita (54%), hematita tabular monocristalina (15,46%), Martita (14%), hematita tabular policristalina (4,66%) e quartzo (11%).

Tabela IV: Composição mineralógica dos rejeitos

MINERAIS	FLOTAÇÃO			SEP. MAGNÉTICA			UNDERFLOW E.		
	Em volume	Peso específico	Em massa	Em volume	Peso específico	Em massa	Em volume	Peso específico	Em massa
Hematita tabular monocristalina	43,85	5,2	58,28	58,05	5,2	68,32	10,79	5,2	15,46
Hematita tabular policristalina	6,94	4,2	7,37	12,92	4,2	12,14	4,07	4,2	4,66
Hematita microcristalina	0,00	4,5	0,00	0,00	4,5	0,00	0,00	4,5	0,00
Hematita Lobular	1,59	4,8	1,95	0,56	4,8	0,61	0,00	4,8	0,00
Martita	0,20	3,9	0,20	0,75	3,9	0,66	13,03	3,9	14,00
Magnetita	0,00	4,3	0,00	0,00	4,3	0,00	0,20	4,3	0,24
Goethita	0,00	3,5	0,00	8,43	3,5	6,68	56,01	3,5	54,00
Agregado terroso	2,38	2,8	1,70	0,75	2,8	0,47	0,81	2,8	0,63
Quartzo	45,04	2,65	30,51	18,54	2,65	11,12	15,07	2,65	11,00
Gibbsita	0,00	2,5	0,00	0,00	2,5	0,00	0,00	2,5	0,00
Outros	0,00	3	0,00	0,00	3	0,00	0,00	3	0,00
Soma	100,00		100,00	100,00		100,00	100,00		100,00

A análise por MEV-AMI* revelou a distribuição, em massa, dos minerais presentes nas amostras da flotação, separação magnética e underflow do espessador (figura 6).

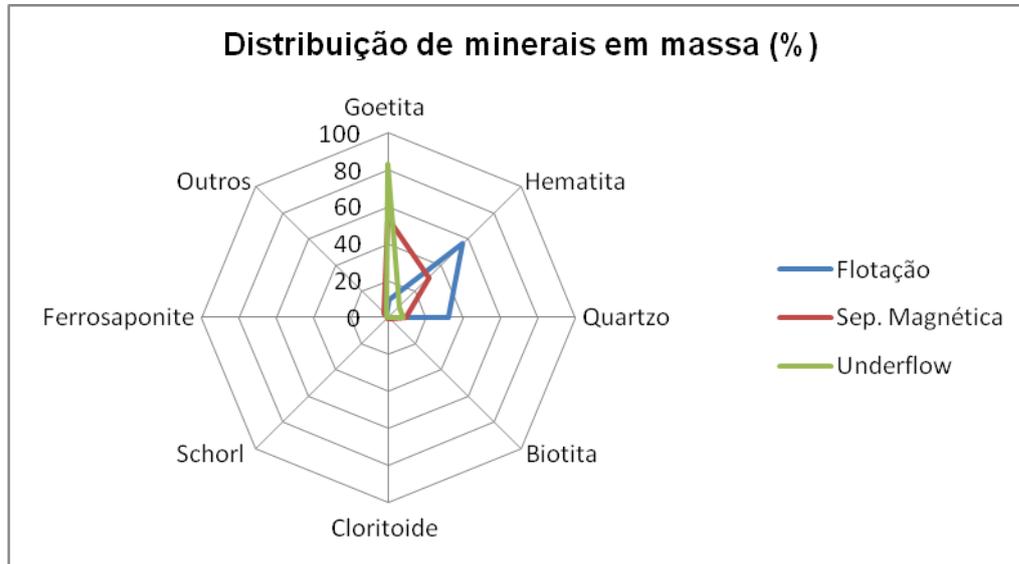


Figura 6: Distribuição de massa dos minerais presentes nas amostras (em%)

*Experiências e análises envolvendo microscopia eletrônica foram realizados no NanoLab Laboratório de Microscopia Eletrônica, na Redemat, Escola de Minas, UFOP, MG, Brasil.

Os autores gostariam de reconhecer o Laboratório de Microscopia Eletrônica NanoLab, na Redemat, Escola de Minas, UFOP, MG, Brasil, para fornecer o apoio material e técnico para experimentos envolvendo microscopia eletrônica.

CONCLUSÕES

As amostras estudadas apresentaram uma granulometria fina, com média abaixo de $45\mu\text{m}$, como foi demonstrado no peneiramento a úmido, no qual as massas retidas nesta granulometria foram inferiores a 46% (flotação), 6% (separação magnética) e 5% (underflow do espessador de lammas). O ensaio de cicloclassificação revelou que o rejeito da flotação possui maior densidade granulométrica na faixa de $14,35$ a $32,13\mu\text{m}$. O rejeito da separação magnética possui maior concentração de partículas com granulometria abaixo de $14,01\mu\text{m}$ e o rejeito do underflow do espessador abaixo de $6,17\mu\text{m}$. Os resultados demonstram que há uma ineficiência dos processos convencionais na recuperação do minério de ferro de granulometria muito fina.

A composição química das amostras é constituída predominantemente por SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Observou-se que a concentração de SiO_2 (e resíduos insolúveis) é inversamente proporcional à de Fe, ao longo das faixas granulométricas. As três

amostras apresentaram elevado teor de Fe (de 52,1 a 56,9%) entre 4 e 6µm, o que sugere que o rejeito possui alto potencial de aplicação.

As análises mineralógicas demonstraram que o ferro presente na amostra da flotação provém essencialmente do mineral hematita. O ferro presente na amostra da separação magnética provém da hematita e goethita. O ferro contido na amostra do underflow é proveniente dos minerais de goethita (em maior parte), hematita e martita. O SiO₂ presente nas três amostras deriva-se predominantemente do mineral quartzo.

Com base nos resultados e estudos externos, conclui-se que os rejeitos possuem alto potencial de reaproveitamento, após processamento ou incorporação de aditivos. Em função das características requisitadas, os rejeitos da flotação podem ser destinados à fabricação de argamassas, pavimentos rodoviários e enchimento de aterros, madeira plástica e compósitos para reforço estrutural. Os rejeitos da separação magnética são indicados para a produção de argamassas, infraestrutura rodoviária e compósitos para reforço estrutural. Os rejeitos do underflow do espessador podem ser empregados na fabricação de argamassas, cerâmica vermelha e compósitos para reforço estrutural.

A reciclagem do rejeito de minério de ferro, além de auxiliar significativamente na redução dos impactos gerados pelo descarte de resíduos na natureza, também contribui agregando valor a um produto da mineração até então considerado sem proveito econômico.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro. À Fundação Gorceix, Nanolab e REDEMAT pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- (1) MORA, N. D.; Apostila de Materiais Elétricos, Capítulo 5: Algumas Técnicas de Caracterização de Materiais, Universidade Federal do Oeste do Paraná - Foz do Iguaçu, 2010.
- (2) BRAGA, P. F. A, COUTO, H. J .B.; Ensaio de Classificação Granulométrica por meio de Cicloclassificador. Comunicação Técnica elaborada para o Livro

Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, Parte II – Classificação, Cap.4
– CETEM / Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2009.

(3) CALLISTER, Jr. W. D; Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 7.
ed. LTC,2008.

COMPARISON BETWEEN MINERALOGICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF IRON ORE TAILING IN ULTRAFINE BANDS FROM DIFFERENT ROUTES OF BENEFICIATION

ABSTRACT

This work presents the characterization of iron ore tailings discarded in flotation, magnetic separation and overflow of sludge thickener, for identification of particle size ranges with more iron content. The characterization by cyclosizer revealed that most of the flotation waste were retained between 6,69 and 32,13 μm , of the magnetic separation below 4,11 μm and the overflow of sludge thickener below 4,02 μm . FRX showed that the flotation and magnetic separation tailings are consist essentially of SiO_2 , Fe_2O_3 and Al_2O_3 , and overflow of SiO_2 and Fe_2O_3 . DRX showed that the flotation sample it's composed by hematite, quartz, kaolinite and talc, magnetic separation by quartz, goethite, kaolinite and rhomboclase, and overflow by quartz, hematite and goethite. By liberation and mineralogy analysis was conclude that tailing shave high iron content and, based on this and other external studies, some routes have been suggested for its reuse.

Key-words: iron ore tailing, characterization, reuse.