



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

INFLUÊNCIA DO CARÁTER MAGNÉTICO NO ESTADO DE AGREGAÇÃO/DISPERSÃO DE POLPAS DE MINÉRIO LATERÍTICO DE NÍQUEL

*A.L.A. SANTOS¹, P.R.G. BRANDÃO¹, S.D.F. ROCHA¹

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas

*E-mail para contato: alassantos@ymail.com

RESUMO – A agregação magnética é um fenômeno observado em partículas finas no processamento mineral e em separação sólido-líquido. Os coágulos são formados pelo caráter atrativo das forças magnéticas, pelas forças de van der Waals e por interações eletrostáticas, indicado pela teoria DLVO estendida. Este trabalho busca avaliar a influência do caráter magnético no estado de agregação/dispersão em polpa de minério laterítico de níquel. O minério foi caracterizado por densidade, granulometria e DRX – goethita, magnetita, hematita, clorita e quartzo. A concentração magnética do material abaixo de 38 μm foi realizada em Whins 3x4L a 800 G. As frações de Alimentação, Não magnético e Magnético foram submetidas a ensaio de sedimentação em tubo de Galéry em pH 4,5, 8,0 e 10,4. O grau de dispersão de Galéry é de 3,0-7,8%, 3,5-32% e 3,8-37% para as amostras Magnética, Alimentação e Não magnética, respectivamente. Ambos aumentam com aumento do pH demonstrando que o aspecto magnético e eletrostático contribuem significativamente para o estado de dispersão das partículas.

1. INTRODUÇÃO

O estado de agregação/dispersão de polpas minerais é importante em diversos processos físicos e físico-químicos, como separação em meio denso por suspensões magnéticas ou mesmo em flotação. O processamento de minerais coloidais leva a uma abordagem dos fenômenos envolvidos nos processos através da Teoria DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) de estabilidade de colóides ou de sua versão mais moderna conhecida como Teoria DLVO estendida (Lins, 2000). Ainda de acordo com Lins, é necessário definir a faixa que corresponde aos finos em tratamento mineral. Segundo ele, os materiais podem ser classificados como supercoloidais ($< 0,2 \mu\text{m}$), coloidais ($< 1 \mu\text{m}$), quase-coloidais ($< 10 \mu\text{m}$), pré-coloidais ($< 20 \mu\text{m}$), finos ($< 100 \mu\text{m}$), médios ($< 500 \mu\text{m}$) e grossos ($> 500 \mu\text{m}$).

A teoria DLVO clássica considera como influentes para o estado de agregação/dispersão de polpas minerais coloidais apenas forças de van der Waals e forças eletrostáticas relacionadas ao

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO



modelo de dupla camada elétrica (DCE). As primeiras são sempre atrativas e dependem exclusivamente da natureza da partícula e do solvente bem como da distância entre as partículas. As forças decorrentes do modelo de DCE podem ser atrativas ou repulsivas dependendo da carga de superfície, da magnitude e da distância entre as partículas. Energeticamente, a interação entre partículas pela teoria DLVO clássica é função da energia de interação de forças de van der Waals (V_W) e da interação eletrostática (V_E) representadas pela Equação 1.

$$V_T = V_W + V_E \quad (1)$$

Entretanto, essa abordagem clássica não é capaz de explicar a maioria dos casos de agregação/dispersão de polpas com características magnéticas ou com materiais hidrofóbicos, etc. Outros termos como, energia estrutural (V_S) devido a mudanças na estrutura das moléculas de água pela vizinhança a superfície sólida; energia atrativa hidrofóbica (V_{AS}) devido à cadeia de hidrocarbonetos dos coletores adsorvidos nas partículas; energia de repulsão estérica (V_{EST}) decorrente de interação de polímeros hidrofílicos em configuração não filamentosa e energia atrativa magnética (V_M), resultado da presença de partículas com elevada susceptibilidade magnética (magnetita) podem ser adicionadas aos termos anteriores da teoria DLVO clássica dando origem a Teoria DLVO estendida (Hotze et al, 2010). A componente de atração magnética pode ser descrita pelos elementos apresentados na Equação 2.

$$V_M = -\frac{8\pi\mu_0 M_s^2 a^3}{9\left(\frac{s}{a}+2\right)} \quad (2)$$

Em que μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, M_s a magnetização de saturação, a o raio da partícula e s a distância entre as superfícies das partículas.

A agregação de partículas magnéticas em uma polpa pode ocorrer através de atração magnética entre partículas de magnetita, mas também por heterocoagulação em sistemas contendo outras fases. As partículas em polpa podem formar, portanto, três tipos de agregados, segundo Lu (2005): agregação por revestimento (*magnetic coating*) ocorre quando as partículas magnéticas são menores que as não magnéticas e tendem a aderir às partículas maiores; agregação por sementeira (*magnetic seeding*) ocorre quando o tamanho das partículas magnéticas e não magnéticas é semelhante e as partículas se agregam de forma intercalada; e agregação por arraste (*magnetic carrier*) em que as partículas magnéticas são maiores que as não magnéticas e estas são atraídas e transportadas junto as partículas magnéticas.

Nesse trabalho buscou-se avaliar o efeito do caráter magnético da polpa no grau de agregação/dispersão da mesma. Estudos envolvendo a estabilidade de suspensões magnéticas para separação em meio denso e aplicações em biomedicina foram sumarizadas por Salum (1999), Kumar (2010), Engdahl (1996) e Kharisov e colaboradores (2014). Entretanto, o comportamento de polpas com caráter magnético envolvendo ensaios de sedimentação para determinação do grau de dispersão/agregação ainda não foi avaliado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de minério laterítico limonítico de níquel de depósito brasileiro foram recebidas em sacos de 5 kg, previamente homogeneizada e amostradas. As amostras foram classificadas com um corte à úmido em 38 μm em peneira Bertel 50x50(cmxcn) montadas em agitador de peneiras Produtes. O undersize ($<38\mu\text{m}$) foi separado e amostrado gerando duas amostras, Alimentação e Separação magnética, as quais foram preparadas para os ensaios de sedimentação em tubo de Galéry. Os ensaios foram realizados em pH 4,5; 8,0 e 10,4 utilizando NaOH (1 mol/L) e HCl (3 mol/L) para controle do pH desejado.

2.1. Separação magnética

A separação magnética foi realizada em separador magnético Carpco Inc. modelo Whins 3x4L utilizando 0,8 A de corrente e matriz de 3,5 mm. Nessas condições, o campo magnético no interior da matriz é de aproximadamente 800 Gauss. A amostra foi preparada em polpa de 20% de sólidos e alimentada no separador de forma descontínua. Assim, a cada 400 mL de polpa foi utilizado 1 L de água de lavagem. A separação magnética foi realizada em três etapas (Rougher, Scavenger e Cleaner) gerando três produtos, como representado na figura 1.

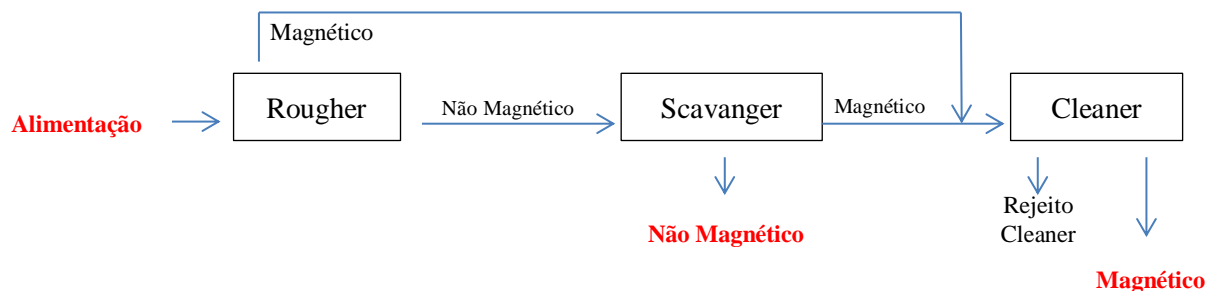


Figura 1 – Fluxograma de separação magnética em separador Whins 3x4L. Destaque, em vermelho, para os produtos utilizados nos ensaios de sedimentação em tubo de Galéry.

2.2. Caracterização das amostras

As amostras utilizadas nos ensaios de sedimentação foram caracterizadas física (granulometria e densidade) e mineralogicamente (difratometria de raios-X). A granulometria foi analisada em Sympatec Helos utilizando hexametáfosfato de sódio 5% m/m como dispersante, lentes com distância focal de 20 mm e tempo de leitura de 6 segundos. A densidade aparente foi avaliada em triplicata pelo método de picnometria à água com picnômetro de vidro de 100 mL JS e balança analítica Shimadzu modelo AY220, com precisão de 0,1 mg.

A caracterização mineralógica qualitativa foi realizada em difratômetro de raios-X Philips (Panalytical) Para amostras em pó com sistema X'Pert-APD, controlador PW3710/31, gerador PW1830/40 e detector PW3020/000 executando varredura de 2 θ de 6°-80°.

2.2. Ensaio de sedimentação em tubo de Galéry

O tubo de Galéry consiste de um tubo com 45 mm de diâmetro e abertura de 4 mm de diâmetro localizada a 1,5 cm do fundo do tubo (figura 2). Os ensaios foram realizados em triplicatas com 5 g de amostra de minério e 200 mL de água. O sistema foi colocado para agitar, vigorosamente, em agitadores magnéticos. Após alcançado o pH de interesse, condicionou-se a suspensão por 30 segundos. Posteriormente, o sistema de agitação foi desligado e o tubo foi retirado da placa de agitação magnética. O processo de sedimentação ocorreu durante 2 minutos depois do qual foram coletados tanto o sobrenadante, acima da abertura de 4 mm de diâmetro, e com o afundado.

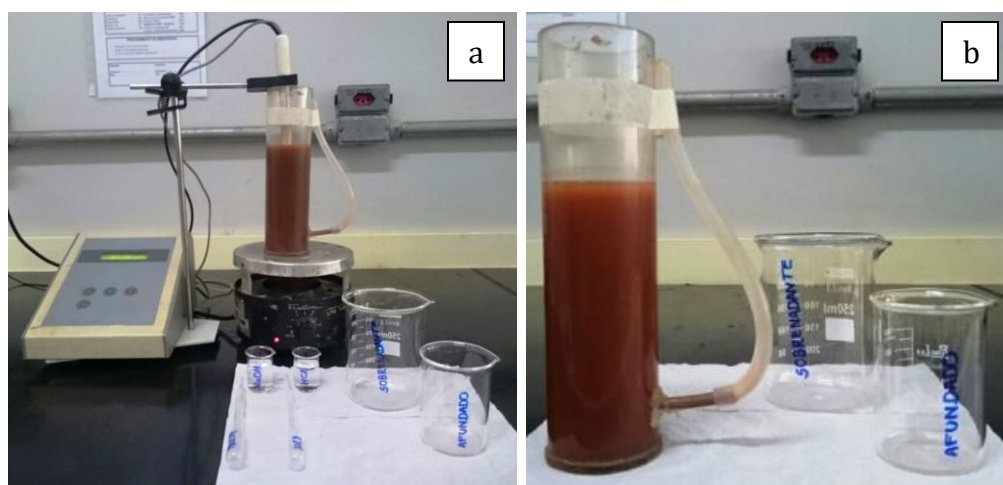


Figura 2 – Ensaio de sedimentação em tubo de Galéry (a) e destaque para o tubo de Galéry (b)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Preparação de amostras

A amostra inicial submetida ao corte à úmido gerou undersize da peneira de 38 μm em total de 2176 g que correspondem a aproximadamente 44% do material peneirado. Esse total foi amostrado de modo a obter 550 g das quais, 150 g foram reservadas e 400 g submetidas à separação magnética.

3.2. Separação magnética

A separação magnética desenvolvida em três etapas gerou como produtos as frações: Não magnético, Magnético e Rejeito Cleaner. Esses produtos correspondem a 58,5%, 23,9% e 17,5%, respectivamente do material recuperado pelo processo de separação magnética. As frações Alimentação, Não magnético e Magnético foram submetidas à caracterização física e mineralógica anteriormente à realização dos ensaios de sedimentação em tubo de Galéry.

3.3. Caracterização física

Aplicando-se os conceitos de Lins (2000) a análise granulométrica apresentada na figura 3 observa-se que as amostras podem ser representadas discretamente por três faixas de tamanho distantes por ordem de grandeza. A faixa manométrica (coloidal), corresponde a fração granulométrica inferior a $1 \mu\text{m}$ e representa 15% da amostra, a quase-coloidal, corresponde a fração granulométrica $1-10 \mu\text{m}$ representando 60% da amostra e por fim, a faixa pré-coloidal, correspondendo às partículas superiores a $10 \mu\text{m}$ e inferiores a $20 \mu\text{m}$ que representam 25% da amostra.

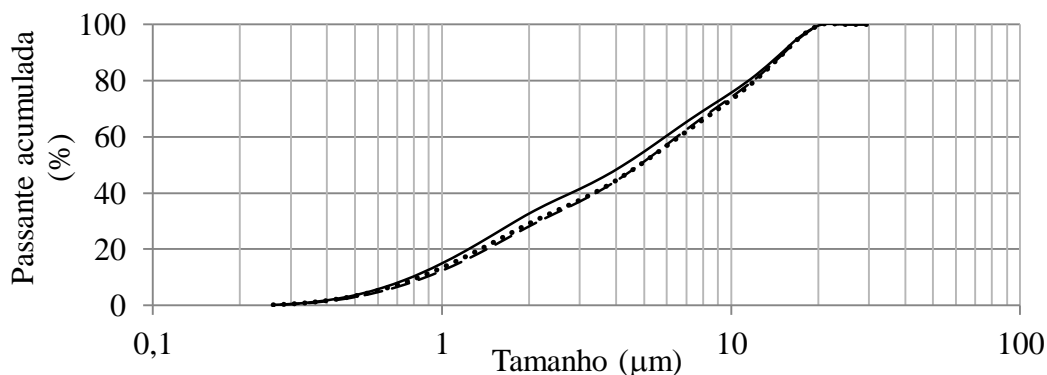


Figura 3 – Distribuição granulométrica das partículas da Alimentação (---), Não magnético SCA (—) e Magnético (...).

Observa-se, portanto, que o volume de partículas abaixo da fase quase-coloidal ($<10 \mu\text{m}$) é bastante elevada, 75%. As amostras são constituídas também por uma quantidade de material bastante fina (coloidais, $<1 \mu\text{m}$), já em tamanhos coloidais, que representam 15% da amostra total. Nessas faixas, os fenômenos de agregação/dispersão já podem ser observados e explicados pela teoria DLVO.

As densidades das amostras, determinadas por meio do picnômetro de vidro estão representadas na tabela I. Observa-se que a diferença entre a densidade das três frações é pequena e, portanto, pode-se considerá-las com densidade semelhante.

Tabela I – Densidade das amostras submetidas ao Ensaio de Galéry

Amostra	Densidade (g/cm^3)	Erro (g/cm^3)
Alimentação	3,1	0,1
Magnética	3,4	0,2
Não Magnético	3,2	0,1

As três amostras estudadas são semelhantes fisicamente. As diferenças entre elas encontram-se, portanto, nas características mineralógicas de cada uma delas.

3.4. Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica indicou como principais constituintes da amostra da alimentação, figura 4 a, as fases minerais clorita, quartzo, goethita, hematita e magnetita. Desses minerais, o majoritário é a clorita dado o número de picos presentes no difratograma e a intensidade dos mesmos. Os óxidos de ferro aparecem presentes também em proporções elevadas, sendo também, um dos principais constituintes.

A separação magnética realizada para concentrar a magnetita na fração magnética foi bastante eficiente. O difratograma da figura 4 b representa a amostra Não magnética, enquanto o difratograma da figura 4 c representa a amostra Magnética. Para essas duas frações observam-se que os picos mais evidentes e numerosos são de clorita e quartzo, para a fração não magnética e magnetita e quartzo para a fração magnética. A avaliação quantitativa da eficiência de separação torna-se difícil, pois ocorre um pico da magnetita e hematita próximo a 2θ de 36° . Para a amostra não magnética é provável que este pico seja mais representativo da hematita que da magnetita, uma vez que o segundo pico de maior intensidade da magnetita ($2\theta = 31^\circ$) não se encontra presente nessa amostra.

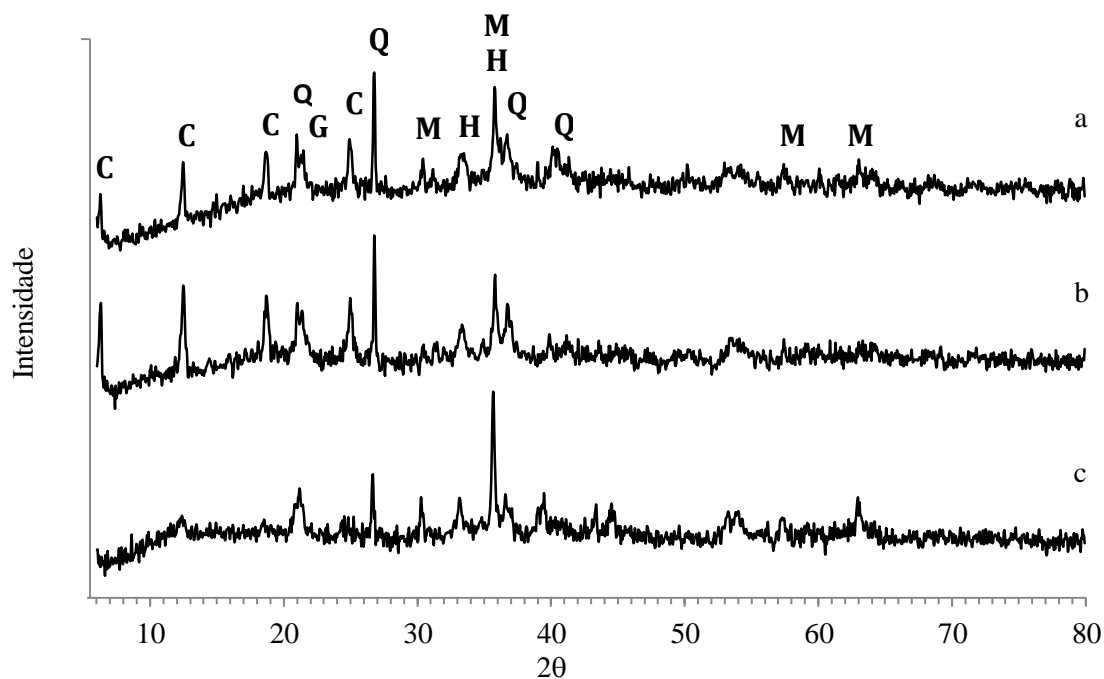


Figura 5 – Difratometria de raios-X da Alimentação (a), Não magnético (b) e Magnético (c).
C – Clorita, Q – Quartzo, G – Goethita, H- Hematita e M – Magnetita

As amostras podem, portanto, ser classificadas em função da quantidade de material magnético presente. De acordo com os difratogramas e principalmente com o número e intensidade dos picos pode-se classificar em ordem crescente o caráter magnético das amostras como na sequência abaixo:

Não Magnético < Alimentação < Magnético

3.5. Ensaio de sedimentação em tubo de Galéry

Os pH's utilizados para os ensaios de sedimentação foram escolhidos de modo que próximo a eles estivessem o ponto isoelétrico dos óxidos de ferro - magnetita, hematita e goethita - e também em uma situação em que a carga de todas as fases encontrassem carregadas de mesmo sinal (Henriques, 2012) para avaliação do caráter magnético e também eletrostático. O grau de dispersão/agregação de uma polpa pelo ensaio em tubo de Galéry (GD_G) é determinado, em porcentagem, pela Equação 3, em que MS_o é a massa de sólidos no sobrenadante e MS_e é a massa de sólidos no sedimento ou afundado.

$$GD_G = \frac{MS_o}{MS_o + MS_e} \times 100 \quad (3)$$

Os resultados representados na figura 5 indicam que independente do pH o grau de dispersão segue a ordem inversa ao caráter magnético da amostra, ou seja o grau de dispersão de Galéry aumenta de acordo com a sequência abaixo

Magnético << Alimentação < Não Magnético

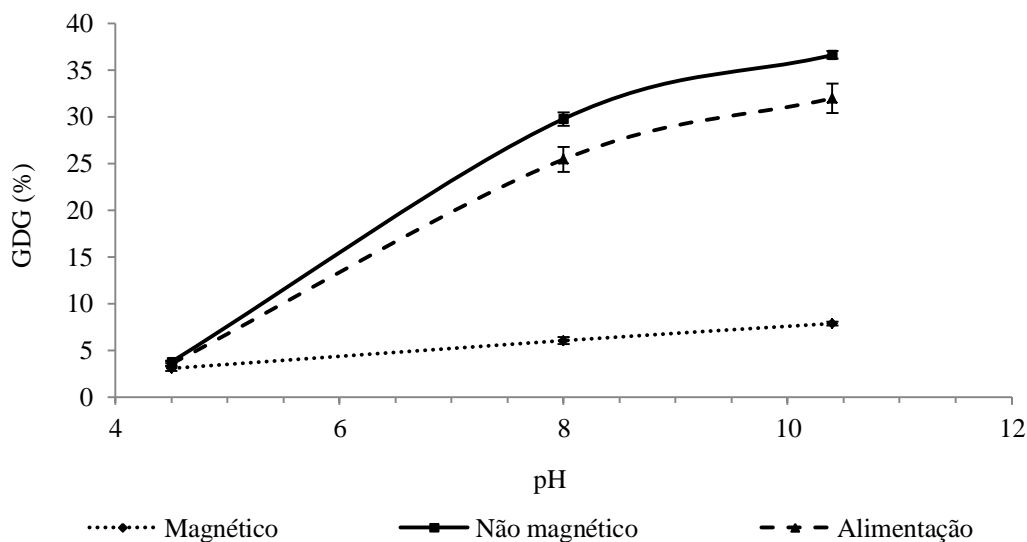


Figura 5 – Grau de dispersão de Galéry para as amostras Magnético, Não Magnético e Alimentação em pH 4,5; 8,0 e 10,4.

É interessante observar que com o aumento do pH, o GD_G aumenta significativamente para as amostras da Alimentação e Não magnético, enquanto que para a amostra Magnético o aumento não é muito significativo. O comportamento da amostra Alimentação é mais semelhante ao da amostra Não magnética. Isso pode ser um indicativo de que o baixo teor de magnetita na amostra Alimentação (< 20%) direciona o comportamento da mesma para um processo semelhante ao da amostra Não Magnética. De acordo com a teoria estendida da DLVO, a componente magnética auxilia na formação de agregados uma vez que ela é sempre atrativa. Embora seja de pequeno alcance, em todos os pH's avaliados, a amostra magnética obteve o menor grau de dispersão dentre as amostras.

Em pH's mais ácidos os minerais da polpa encontram-se carregados tanto negativamente (quartzo) como positivamente (hematita, goethita) além de ligeiramente carregados positivamente (magnetita). Assim, a diferença no grau de dispersão é bastante sutil, pois as partículas agregam de forma heterogênea e promovem a sedimentação mais rápida, evidenciada pela menor massa do sobrenadante. Por outro lado, com o aumento do pH, a carga de superfície do modelo de dupla camada elétrica tende a adquirir mesmo sinal e aumentar o módulo do mesmo. Os resultados demonstraram que o aumento do pH aumenta o grau de dispersão, entretanto a relação mantém-se a mesma em função do caráter magnético.

Os agregados formados durante o ensaio de sedimentação não foram visualizados com clareza. Entretanto, a partir dos conceitos abordados por Lu (2005) e Lins (2000) a formação de heterocoagulação contribuem para a redução do grau de dispersão das amostras. A granulometria do material é bastante variada, alcançando até duas ordens de grandezas diferentes. Entretanto, a maioria do material (60%) encontra-se na faixa ente 1-20 μm . Sendo assim, principalmente para a amostra Magnética a principal forma de agregação seria através de sementeira. Para as demais amostras, como a presença de magnetita é menor, a co-agregação por arraste e por revestimento podem ser mais favoráveis.

4. CONCLUSÃO

O caráter magnético influencia significativamente o estado de dispersão/agregação de polpas de minério diluídas. A influência é evidenciada em partículas com granulometria fina, abaixo de 38 μm . Como previsto pela teoria DLVO estendida, não só o caráter magnético das partículas influencia a dispersão da polpa, mas também o caráter eletrostático demonstrado nesse experimento pela variação do pH. O grau de dispersão de Galéry obtido para as amostras variam de 3,0-7,8%, 3,5-32% e de 3,8-37% para as amostras, Magnética, Alimentação e Não magnético, respectivamente, em função do pH. Há ainda uma relação inversa entre caráter magnético (Não Magnético < Alimentação < Magnético) e grau de dispersão da polpa (Magnético << Alimentação < Não Magnético).



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio e suporte financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

ENGDAHL, G.; LERBOURG, B. Experimental study of magnetic slurries regarding magnetic properties. IEEE Transactions on Magnetics. v. 32, n 5, p5109-5111. 1996.

HENRIQUES, A.B. Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: Hematita, goethita e magnetita. 2012. 223 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

HOTZE, E.M.; PHENRAT, T.; LOWRY, G.V. Nanoparticle aggregation: Challenges to understanding transport and reactivity in the environment. J. Environ. Qual. v. 39, p1909-1924. 2010.

KHARISOV, B.I. et al. Solubilization, dispersion and stabilization of magnetic nanoparticles in water and non-aqueous solvents: recent trends. RSC Adv. v. 4, p45354-45381. 2014.

KUMAR, S.; RAVIKUMAR, C.; BANDYOPADHYAYA, R. State of dispersion of magnetic nanoparticles in an aqueous medium: Experiments and Monte Carlo simulation. Langmuir. v. 26, n 23, p18320-18330. 2010.

LINS, F.A.F.; ADAMIAN, R. Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000. Série Tecnologia Mineral, v. 78, 29p.

LU, S.; PUGH, R.J.; FORSSBERG, E. Chapter 9 – Magnetic co-aggregation and combined aggregation. Studies in Interface Science. v. 20, p497-516. 2005.

SALUM, M.J.G. Estudo do uso do magstream na flotabilidade de alguns sistemas minerais. 1999, 142 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1999.

PROMOÇÃO



REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO

