

EFEITO DA ADIÇÃO DE REAGENTES AUXILIARES NA FILTRAGEM E SUAS CONSEQUÊNCIAS NO PELOTAMENTO¹

Thiago Marchezi Doellinger²
Maurício Cota Fonseca²
Adail Mendes Araujo Junior²
Henrique Dias Gatti Turre³
Priscilla Messias Pereira³
Vinicius Perin Passigati⁴
Antônio Eduardo Clark Peres⁵

Resumo

Utiliza-se surfatantes como uma alternativa diante de algum distúrbio que impacte o desempenho da filtragem. Buscou-se neste trabalho verificar os benefícios do uso de surfatantes na formação e desaguamento das tortas de minério de ferro durante o processo de filtragem. O estudo também verificou os impactos da presença de surfatante no *pellet feed* durante a etapa do pelotamento. Observou-se por testes de folha que vários reagentes apresentaram redução significativa da umidade da torta, mantendo-se a mesma produtividade da filtragem comparada ao teste padrão (sem a adição de surfatante). A diminuição das forças capilares, ocasionada pela redução na tensão superficial da água pela presença de surfatante, afetou a taxa de crescimento das pelotas durante o pelotamento.

Palavras-chave: Surfatante; Filtragem; Pelotamento.

EFFECTS OF HELPER REAGENTS ON THE FILTERING PROCESS AND THEIR CONSEQUENCES OVER PELLETIZING

Abstract

The chemical reagents are very important in the dewatering of pulps that contain fine particles. The objective of this work was to study the benefits of using surfactants in dewatering and formation of pellet feed cakes during filtration. The influence of surfactants on green pellet formation has also been evaluated. Firstly, plenty of samples from different suppliers were tested by qualitative analysis in order to evaluate foam development over iron ore sludge. Only one supplier was disqualified at this stage. The others were also tested by running a leaf test. It has been noticed that all samples were able to significantly reduce the cake moisture, keeping the same productivity level in comparison with the standard test (without surfactant addition). The best surfactants were used so as to evaluate their influence on the pelletizing. The surface tension reduction mechanism caused by surfactant addition was responsible to some extent for the pellet quality drop, both growing rate and strength.

Key words: Surfactant; Filtering; Pelletizing.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Engenheiro Metalurgista, Samarco Mineração S.A. – Ponta Ubu, Anchieta – ES.

³ Engenheiro(a) de Minas, Samarco Mineração S.A. – Ponta Ubu, Anchieta – ES.

⁴ Tecnólogo em Metalurgia e Materiais, Samarco Mineração S.A. – Ponta Ubu, Anchieta – ES.

⁵ PhD da Pós-Graduação de Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG – Belo Horizonte – MG.

1 INTRODUÇÃO

O processo de filtração de minério de ferro resume-se em separar os sólidos do líquido (água) presente na polpa gerada no processo de concentração e utilizada no processo de pelletização. Este processo leva à formação do *pellet feed*, cuja umidade é fundamental na etapa seguinte de aglomeração do minério de ferro.

Os reagentes auxiliares de filtração, como os surfatantes, são de extrema importância no desaguamento de polpas contendo finos e ultrafinos. Diversos estudos têm sido desenvolvidos na busca de reagentes que sejam mais eficazes, que apresentem baixo custo e que possam reduzir a umidade das tortas formadas. Dias et al.^(1,2) mostraram em duas amostras distintas que, apesar dos surfatantes causarem significativa redução na tensão superficial, os mesmos não foram eficazes na redução da umidade em até 90 g/t. Por sua vez, Ramos et al.⁽³⁾ verificaram que a adição de 50 g/t causava a redução de mais de 1,0% (valor absoluto) na umidade e que o decréscimo era proporcional à dosagem utilizada.

Testes com cinco reagentes com diferentes grupos químicos resultaram em diminuição da umidade e aumento da taxa de filtração dentro de uma estreita faixa de concentração, de 1 g/t até 10 g/t, otimizando a filtrabilidade de *pellet feed* floculado. A utilização de surfatante resultaria em diminuição do custo de produção pela economia com óleo para evaporação da umidade.^(4,5) A utilização, interações e mecanismos de adsorção em polpas de caulim contendo surfatantes, auxiliares de filtração, e com poliacrilamidas, floculantes, foram amplamente estudados por outros pesquisadores.⁽⁶⁻⁹⁾

A molécula do surfatante caracteriza-se por apresentar um caráter duplo: um ou mais grupos hidrofílicos (sulfonato, sulfato, carboxilato, etoxilato, entre outros) e um grupo hidrofóbico (cadeias hidrocarbônicas). Alguns surfatantes são tensoativos, sendo capazes de diminuir a tensão superficial do líquido por meio de uma interação com a superfície do mesmo. Essa interação levará a uma redução das forças de coesão existentes na superfície do líquido.

A utilização de surfatantes torna-se uma alternativa diante de algum distúrbio de processo e/ou variação nas características do concentrado que impacte no desempenho da filtração. O surfatante possibilita uma melhora no desempenho da filtração, com o aumento da produtividade e uma redução da umidade do *pellet feed* produzido. Existem dois mecanismos principais de atuação dos surfatantes no desaguamento de polpas aquosas:

- atuação na interface sólido/líquido, tornando a superfície do mineral hidrofóbica; e
- atuação sobre a interface líquido/ar, diminuindo a tensão superficial. Há, nesse caso, uma diminuição nas forças responsáveis pela retenção da água nos capilares da torta.

Um dos maiores complicadores do uso dos surfatantes encontra-se na tendência do mesmo em formar espuma. Dependendo do grau de formação de espuma, problemas operacionais poderão ocorrer no circuito de processamento. Além disso, pouco se estudou sobre as consequências da presença de surfatantes no *pellet feed* durante a etapa de pelletamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Várias formulações de surfatante, de seis diferentes fornecedores, foram testadas. Os fornecedores foram designados pelas letras A, B, C, D, E e F. Cada

formulação testada recebeu a letra do seu respectivo fornecedor precedida por um número (exemplo, A.1, A.2, A.3, etc.).

Inicialmente, todos os produtos foram testados em relação à formação de espuma. Esse teste consistiu na adição de surfatante em uma dosagem padrão em uma proveta de 1 litro, seguido de 20 agitações com plunger. O surfatante é reprovado nessa etapa se a formação de espuma for excessiva ou não desaparecer com o tempo. Para cada surfatante, dois testes foram conduzidos: um somente com água de processo (denominado de branco), e outro com o produto em teste.

Para os ensaios em laboratório foram utilizados um conjunto de teste de folha, ilustrado na Figura 1, com área de filtragem igual a 94 cm^2 . O tempo de formação e secagem de torta foram mantidos constantes para todos os testes. A pressão de vácuo foi ajustada em 760 mmHg. Durante a formação, a polpa era mantida em agitação manual. A umidade foi determinada após secagem da torta em estufa a 100°C por uma hora. Um teste consiste na média de duas tortas filtradas a partir da mesma amostra com cerca de 5 litros de polpa. Todas as amostras para realização dos testes de folha foram coletadas na área industrial em forma de polpa. Assim como no teste de formação de espuma, o teste padrão (branco) também foi realizado para comparar o desempenho dos surfatantes.

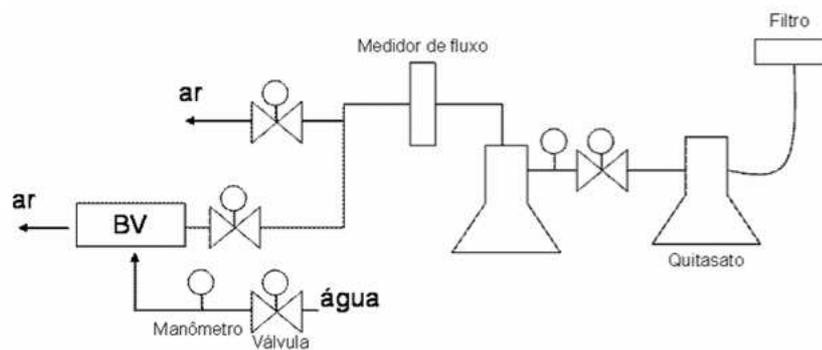


Figura 1 – Imagem e desenho esquemático do teste de folha utilizado no estudo.

Os ensaios de pelotamento foram realizados em disco piloto, ilustrado na Figura 2. O disco possui diâmetro interno de 100 cm. Os testes foram conduzidos a uma rotação e inclinação constantes, assim como a taxa de alimentação. Somente as formulações (limitadas a uma por fornecedor) que apresentaram os melhores resultados no teste de folhas e no ensaio de formação de espuma foram submetidas ao teste de pelotamento.

O *pellet feed* utilizado nos testes de pelotamento foi coletado na área industrial, após a etapa de filtragem e prensagem nas prensas de rolos. As quantidades adicionadas de água e insumos na etapa de mistura foram feitas com base na caracterização química do *pellet feed* e balanço de massa. Com isso, os teores de carbono fixo, calcário, aglomerante orgânico, soda cáustica e umidade da mistura foram mantidos constantes durante os ensaios. Desta forma, apenas o surfatante apresentava-se como variável durante os ensaios, possibilitando avaliar o seu impacto no pelotamento.



Figura 2 – Imagem do disco de pelotamento de laboratório.

Cada surfatante foi testado a uma concentração padrão, adicionado na mistura na forma de solução aquosa. Um teste sem a adição de surfatante no *pellet feed* foi realizado como padrão de comparação com os resultados obtidos nos demais testes. As pelotas cruas obtidas foram avaliadas pelo seu diâmetro médio e análise qualitativa de seu acabamento superficial. As pelotas na faixa granulométrica entre 16,0 mm a 12,5 mm foram submetidas a testes de compressão (máquina Kratos da DEK-MP) e a teste de quedas (altura de 45 cm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente os reagentes foram avaliados quanto à formação de espuma. Todos os surfatante testados foram aprovados, com exceção das formulações apresentadas pelo fornecedor F, que apresentou formação excessiva de espuma em todas as amostras testadas, mesmo na presença de altas dosagens de antiespumante (Figura 3).

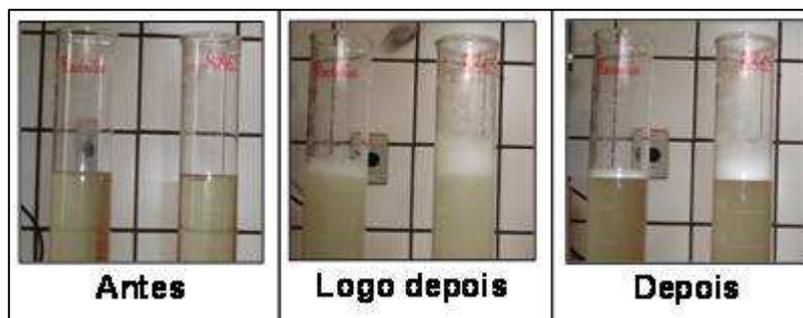


Figura 3 – Registros dos ensaios de formação de espuma com uma das formulações do fornecedor reprovado. As provetas da esquerda referem-se ao branco, com apenas água do processo.

Em alguns casos, houve a necessidade de aumentar a dosagem padrão de antiespumante realizada nos testes. Porém, estes níveis utilizados não inviabilizariam a utilização do surfatante em escala industrial.

Nos testes de folha, cada surfatante foi testado quanto a sua capacidade de redução da umidade da torta formada. O teste foi realizado logo após a coleta de amostras de polpa na área. A formulação A.1 foi testada em todas as amostras de polpa coletadas devido a sua capacidade de redução da umidade do *pellet feed* já ser conhecida,⁽¹⁰⁾ servindo assim como parâmetro de comparação com os resultados obtidos para as outras formulações.

As formulações apresentadas pelo fornecedor E apresentaram baixo desempenho, nenhuma capaz de reduzir significativamente a umidade do *pellet feed*. Seus resultados não serão discutidos no artigo.

Os resultados dos demais reagentes são apresentados na Figura 4. As variações de umidade e produtividade entre os diferentes dias devem ser atribuídas à qualidade da polpa utilizada no teste (coletada somente no dia da realização do teste). Todas as demais formulações foram capazes de reduzir a umidade da torta formada.

Após os testes exploratórios, planejou-se a execução de testes que possibilitassem avaliar o efeito dos surfatantes em materiais com diferentes superfícies específicas. Nesta etapa, foram selecionadas as formulações que apresentaram os melhores resultados, limitando-se a apenas uma formulação para cada fornecedor. Os resultados de umidade das tortas formadas são apresentados na Figura 5.

Todos os surfatantes foram efetivos na redução de umidade, tanto com material de alta quanto de baixa superfície específica. A redução da umidade foi mais pronunciada nas condições em que o sólido no concentrado apresentou-se com alta superfície específica. As formulações A.1 e B.1 apresentaram os melhores desempenhos com, respectivamente, alta e baixa superfície específica. A formulação D.1 apresentou comportamento pouco esperado, ou seja, uma redução de umidade inversamente proporcional a sua dosagem. Esse fenômeno pode estar associado à presença de antiespumante na própria formulação do surfatante. Observou-se que a dosagem padrão foi suficiente para proporcionar uma redução da umidade da ordem de 1% absoluto para todas as quatro formulações testadas.

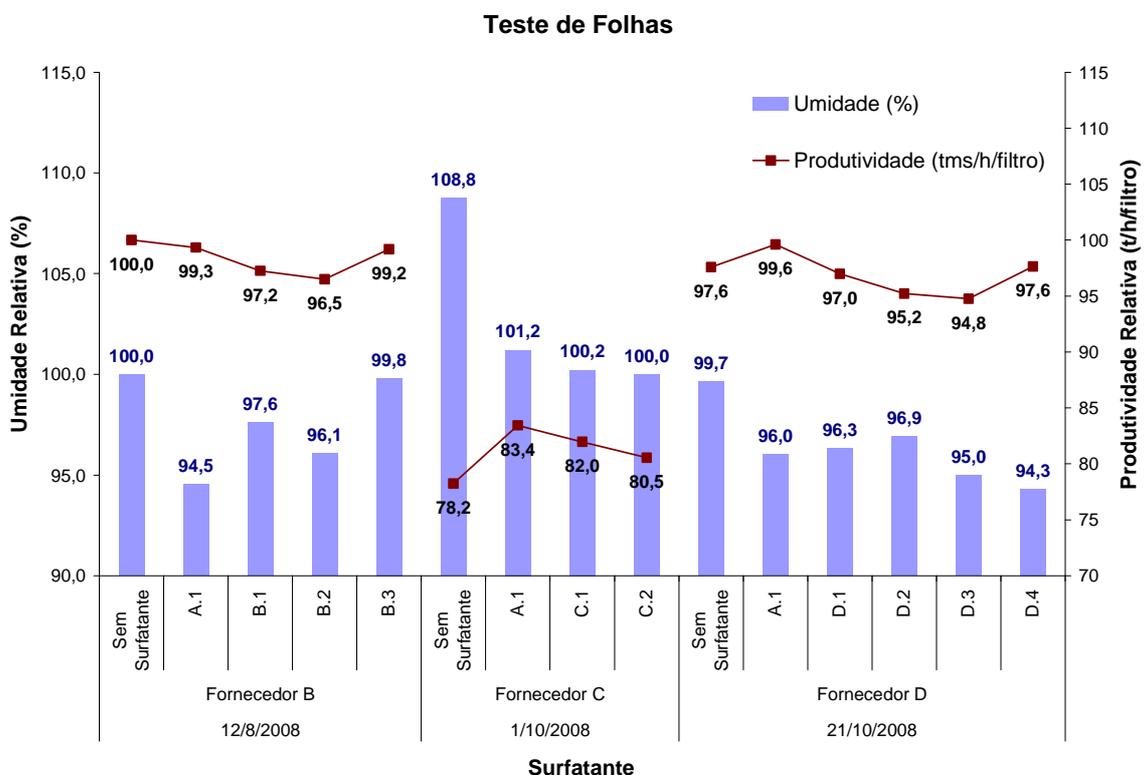


Figura 4 – Resultados dos testes exploratórios com vários surfatantes de diferentes fornecedores.

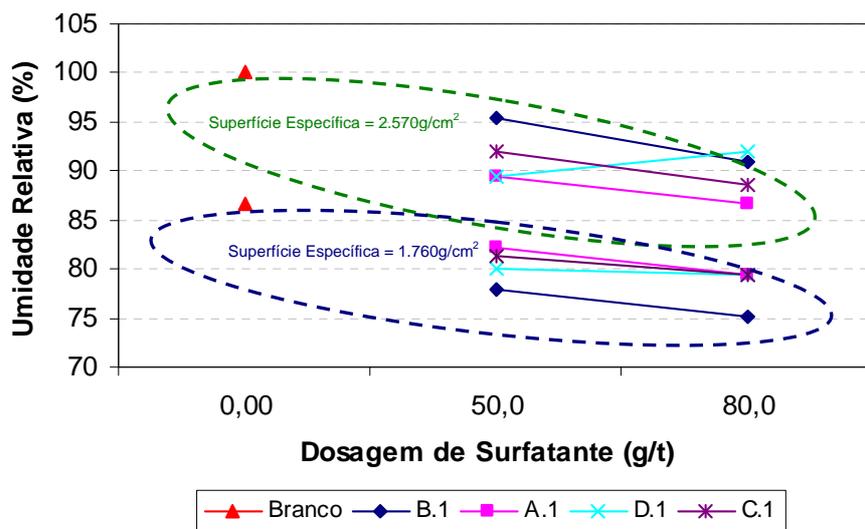


Figura 5 – Resultados de umidade das tortas em função da superfície específica dos sólidos no concentrado e do tipo de surfatante.

A análise de variância dos resultados obtidos indicou que a superfície específica do material, que variou de 1.760 cm²/g a 2.570 cm²/g, foi a grandeza mais significativa, confirmando o efeito negativo do aumento dessa variável no desempenho da filtragem. A Figura 6, realizada com dados industriais, mostra que quanto maior a superfície específica do material processado, menor será a produtividade da filtragem e maior a umidade do *pellet feed*. Foi observado ainda que a adição de surfatante não apresentou efeito estatisticamente significativo na produtividade.

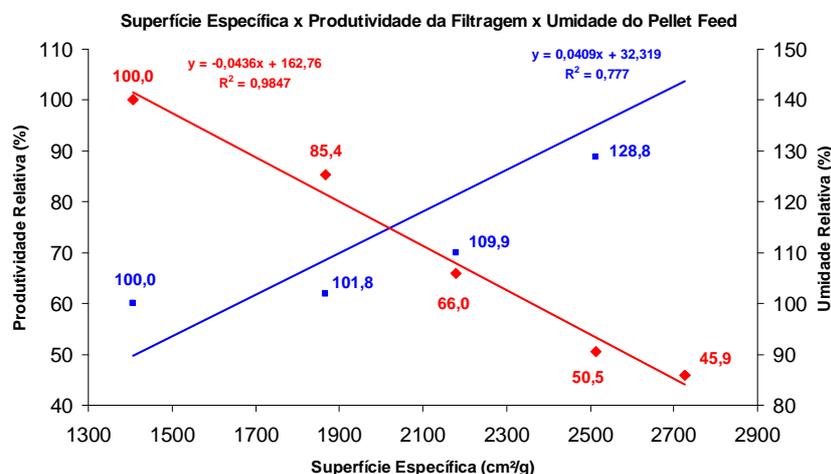


Figura 6 – Influência da superfície específica na filtragem.

De modo a verificar os efeitos da presença do surfatante na aglomeração do minério de ferro, foram realizados testes em escala piloto variando-se apenas o tipo de surfatante no *pellet feed*. As Tabelas 1 e 2 mostram a caracterização química e física do *pellet feed* utilizado, assim como as condições de cada teste.

Tabela 1: Caracterização do *pellet feed* utilizado nos testes de pelotamento em escala piloto

ANÁLISES QUÍMICAS (%)	
FeT	67,00
SiO ₂	0,93
Al ₂ O ₃	0,34
CaO	0,11
MgO	0,03
PPC	2,68
P	0,040
UMIDADE (%)	9,50
TESTES FÍSICOS	
GRANULOMETRIA (%)	
-325#	90,9
SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	
SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm ² /g)	2000

A Figura 7 mostra fotos das pelotas obtidas em cada teste. As pelotas produzidas no teste padrão, sem surfatante, apresentaram boa homogeneidade no crescimento, acabamento superficial bom e boa umidade superficial.

Tabela 2: Parâmetros dos testes

PARÂMETROS DO TESTE					
TESTE	PADRÃO	1	2	3	4
UMIDADE PF (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
SURFATANTE UTILIZADO	--	A.1	B.1	C.1	D.1

Todos os surfatantes propiciaram a formação de pelotas com bom acabamento superficial e com a umidade superficial acima do comumente observado em testes em escala piloto. Esta alta umidade superficial auxiliou no bom acabamento da pelota. Se esta umidade for excessiva, a pelota poderá ficar plástica, prejudicando a etapa de endurecimento via tratamento térmico. A elevada umidade superficial observada na presença do surfatante levou à formação de cachos durante o pelotamento, propiciando a formação de pelotas com formato irregular.

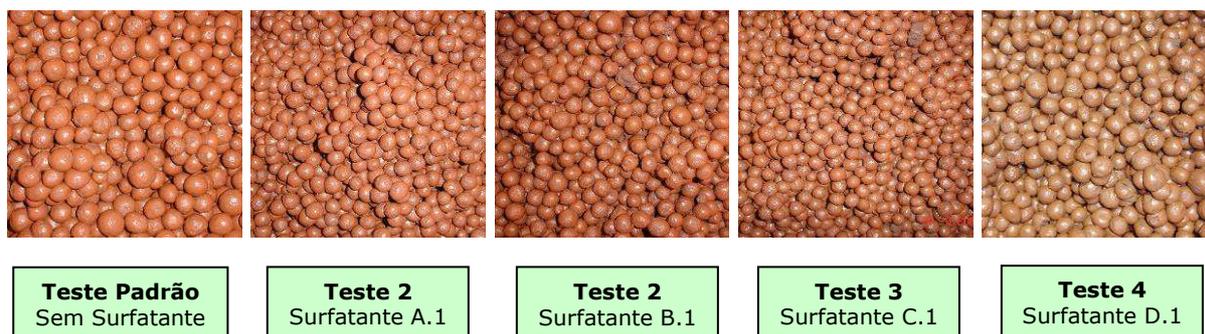


Figura 7 – Imagem das pelotas produzidas em cada teste.

A Figura 8 mostra o diâmetro médio obtido em cada teste. Todas as pelotas com surfatantes apresentaram um diâmetro médio menor que a pelota produzida no teste padrão. Apenas as pelotas produzidas com o surfatante D.1 apresentou um resultado satisfatório, com um diâmetro médio de 11,98 cm.

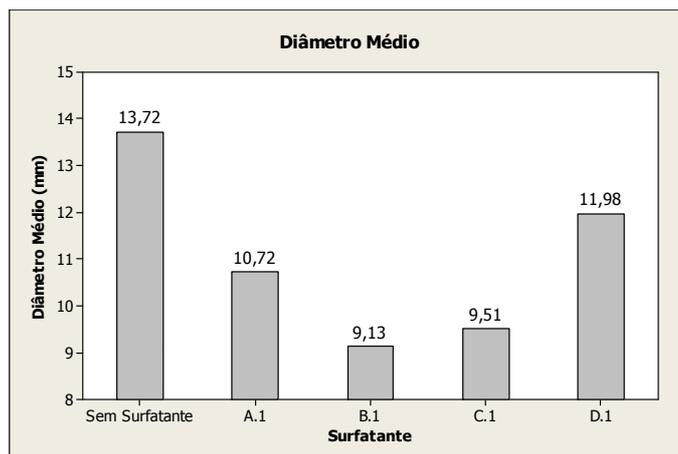


Figura 8 – Diâmetro médio das pelotas.

A formação das pelotas cruas envolve duas fases: uma sólida e uma líquida. A fase sólida consiste na mistura de finos de minérios e dos demais aditivos, como carvão, aglomerante e calcário. A fase líquida, por sua vez, consiste na água. O pequeno diâmetro das pelotas com surfatante contradiz com o fato das mesmas apresentarem uma alta umidade superficial. Teoricamente, esperava-se que a elevada umidade aparente favorecesse a taxa de crescimento das pelotas, o que não ocorreu.

Por apresentar caráter duplo, o grupo hidrofílico do surfatante pode ter interagido com a superfície negativa do minério (pH do *pellet feed* em torno de 10 após a mistura), dificultando o recobrimento das partículas por um filme de água devido às mesmas assumirem um caráter hidrofóbico após esta interação. Este fenômeno conduz a formação de pelotas secas internamente, mas com alta umidade superficial.

Modificações que acarretem na redução da tensão superficial da água podem afetar na taxa de crescimento das pelotas. Nos testes realizados, há uma competição entre o aglomerante orgânico, capaz de aumentar a viscosidade da água e favorecer na formação dos sistemas capilares, com o surfatante, capaz de diminuir a tensão superficial e o desenvolvimento de pontes líquidas. Portanto, a dosagem utilizada do surfatante no pelletamento deve ser levada em consideração de modo a reduzir os efeitos no desempenho do aglomerante orgânico.

Dentre as variáveis que impactam na operação do disco e, conseqüentemente, no diâmetro da pelota, temos a taxa de alimentação dos discos, velocidade de rotação, inclinação, posição e inclinação dos raspadores etc. A taxa de crescimento das pelotas pode ser melhorada aumentando-se o tempo de residência do material no disco pelletizador. Portanto, mesmo diante da adição de surfatante, existem parâmetros de controle que podem compensar a pequena taxa de crescimento, levando à formação de pelota dentro da granulometria adequada.

Devido à baixa taxa de crescimento, as pelotas com os surfatantes A.1, B.1 e C.1 não foram submetidos aos testes físicos de caracterização da pelota crua, pois não houve pelotas suficientes na faixa entre 16,0 mm e 12,5 mm. Somente a formulação D.1 possibilitou a obtenção de pelotas em quantidade suficiente para a continuidade dos testes.

A Figura 9 mostra que, embora tenha apresentado um número de quedas inferior à pelota obtida no teste padrão, o surfatante D.1 formou pelotas com uma resiliência suficiente para suportar os impactos causados pelo transporte do disco de pelletamento até a entrada nos fornos de endurecimento. É importante ressaltar que

elevados valores no teste de quedas podem ser correlacionados a uma excessiva plasticidade das pelotas, levando à formação de cachos, deformação das pelotas e dificuldade na permeabilização do leito durante a etapa de queima.

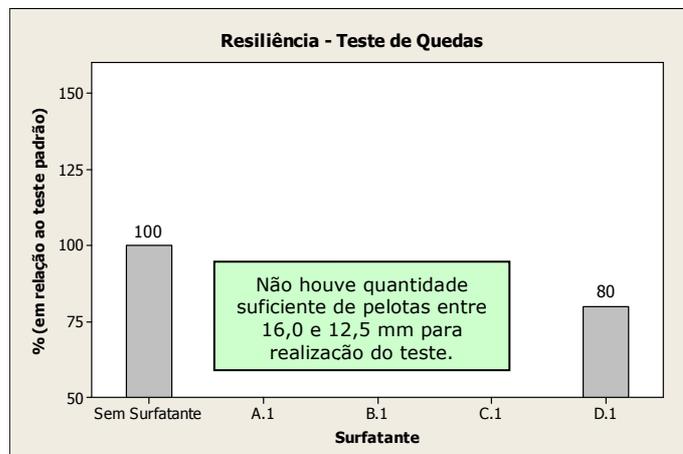


Figura 9 – Teste de Quedas na Faixa Maior (-16,0 mm +12,5mm).

De modo a possibilitar uma comparação da resiliência das pelotas obtidas com cada surfatante, foi realizado um teste de quedas na faixa menor, ou seja, com pelotas entre 12,5 mm e 10 mm (Figura 10). Todos os aglomerantes apresentaram resultados satisfatórios, na maioria dos casos igual ou superior ao obtido com a pelota do teste padrão (sem adição de surfatante).

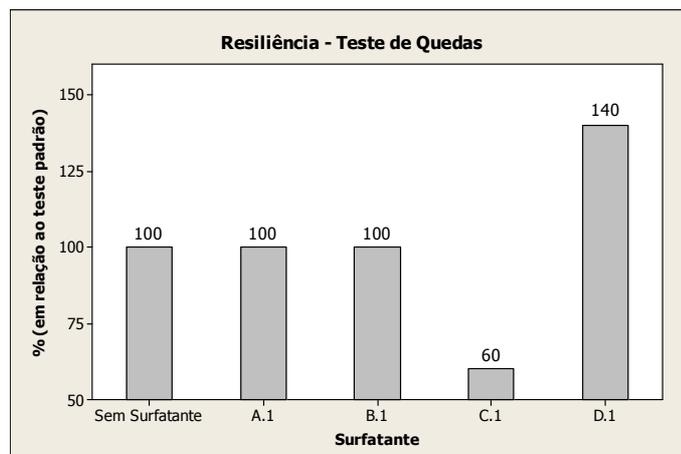


Figura 10 – Teste de Quedas na Faixa Menor (-12,5 mm+10 mm).

A Figura 11 mostra os resultados de compressão da pelota crua úmida (CPCU) na faixa maior. Os resultados obtidos com a formulação D.1 (única que produziu pelotas na faixa granulométrica entre 16,0 mm e 12,5 mm) foram inferiores aos níveis de compressão registrados para as pelotas produzidas no teste padrão. Este desempenho está relacionado a uma diminuição da pressão negativa dos capilares nos poros. Cota Fonseca⁽¹¹⁾ mostrou que o grau de saturação dos poros, também afetado pela presença dos surfatantes, tem uma forte influência na resistência à compressão das pelotas cruas.

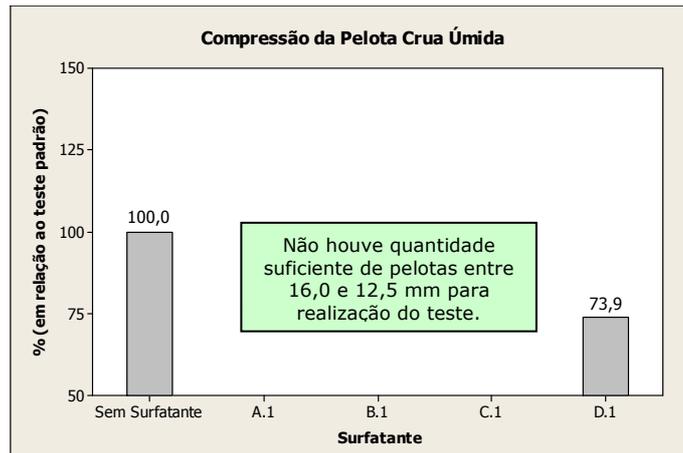


Figura 11 – Compressão da Pelota Crua Úmida (-16 mm + 12,5 mm).

Os resultados de CPCU na faixa menor, visto na Figura 12, mostram que os surfatantes estão influenciando na resistência mecânica da pelota crua. Observa-se que todos os surfatantes apresentaram valores de compressão inferiores às pelotas produzidas no teste padrão.

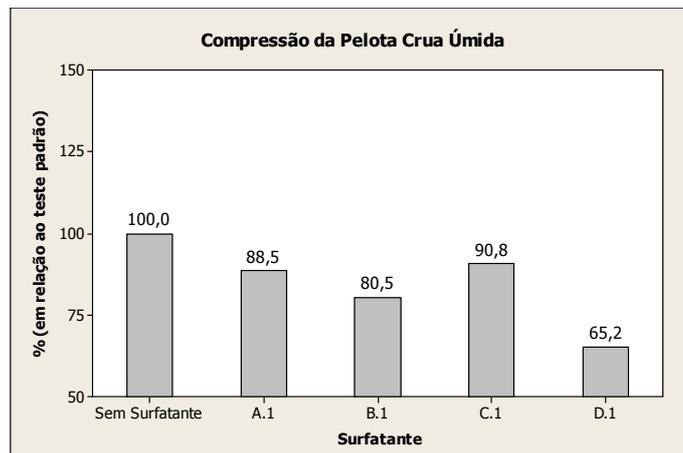


Figura 12 – Compressão da Pelota Crua Úmida (-12,5 mm + 10 mm)

A presença de surfatante também afetou a compressão da pelota crua seca, conforme mostra a Figura 13. Os resultados de CPCS na faixa maior obtidos com o surfatante D.1 foram inferiores em comparação aos obtidos com a pelota do teste padrão. O surfatante afetou na habilidade da água de preencher os vazios intersticiais entre as partículas sólidas. Com isso, a formação do sistema capilar, importante na formação da pelota, ficou comprometida devido à diminuição das forças que se estabelecem nas interfaces sólido/líquido. Isso refletirá na compactação do aglomerado e conseqüentemente na resistência mecânica da pelota, resultando num baixo valor de CPCS.

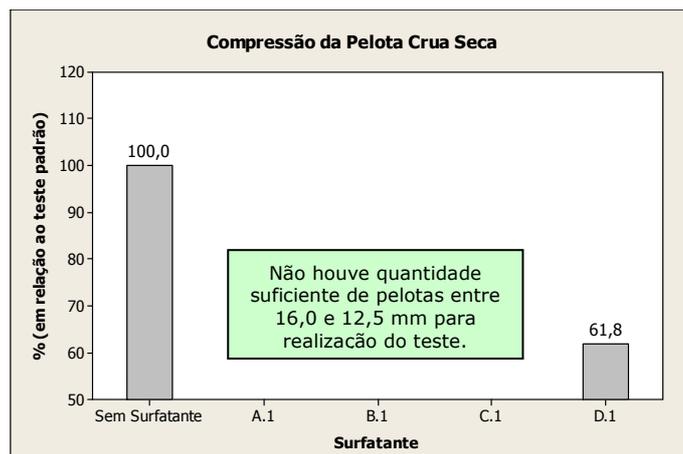


Figura 13 – Compressão da Pelota Crua Seca (-16 mm + 12,5 mm).

5 CONCLUSÃO

De todos os surfatantes avaliados, a maioria foi capaz de manter a formação de espuma em níveis aceitáveis e reduzir significativamente a umidade da torta, mesmo com material de maior superfície específica. O reagente que apresentou melhor desempenho no nível inferior de superfície específica foi diferente daquele que apresentou melhor desempenho no nível superior. A redução da umidade foi mais pronunciada nas condições em que o sólido no concentrado apresentou-se com alta superfície específica.

Todos os surfatantes influenciaram de alguma forma no pelotamento. Somente a formulação D.1 formou pelotas com uma boa taxa de crescimento, embora com diâmetro médio inferior às pelotas obtidas no teste padrão. As pelotas com o surfatante A.1, B.1 e C.1 apresentaram um diâmetro médio que impossibilitou a realização dos testes de CPCU, CPCS e resiliência na faixa maior (granulometria entre 12,5 mm e 16,0 mm).

No geral, houve uma piora no pelotamento com a presença de surfatante no *pellet feed*. As pelotas apresentaram uma alta umidade superficial, embora estivessem secas por dentro. A redução na tensão superficial da água ocasionada pelo efeito tensoativo do surfatante, assim como a diminuição das forças capilares, afetaram na taxa de crescimento e na resistência mecânica das pelotas. Estes fenômenos podem ser minimizados, por exemplo, pela diminuição da dosagem do surfatante a níveis que prevaleça o aumento da viscosidade da água pelo aglomerante orgânico, com conseqüente desenvolvimento das pontes líquidas que atuarão sobre as superfícies das partículas de minério durante a etapa de aglomeração.

REFERÊNCIAS

- DIAS, C. L. P., SILVA, L. M., PERES, A. E. C., VALADÃO, G. E. S. Utilização de Reagentes Auxiliares na Filtragem. Revista da Escola de Minas, v. 57, n. 4, p. 229-234, 2004.
- DIAS, C. L. P., VALADÃO, G. E. S., AMARANTE, S. C., ARAUJO, A. C. Características de Tortas de Filtragem em Presença de Reagentes Auxiliares de Filtragem. In: XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2002, Recife. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Recife: Fundação de Biblioteca Nacional, 2002. v. 1. p. 499-505.

- 3 RAMOS, L., SANTANA, A. N., VALADÃO, G. E. S., PAVEZ, O. A Influência de Reagentes Auxiliares na Filtragem de Pellet Feed Fines. In: III ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL DE TECNOLOGIA MINERAL/XV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 1992, São Lourenço. III ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL DE TECNOLOGIA MINERAL/XV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS. São Lourenço: ABTM, 1992. v. 2. p. 660-674
- 4 BESRA, L., SINGH, B. P. The effect of flocculants and surfactants on the filtration dewatering of iron ore fines. Separation science and technology, v. 32, p. 2201-2219, 1997.
- 5 BESRA, L., SINGH, B. P., REDDY, P.S.R., SENGUPTA D.K. Influence of surfactants on filter cake parameters during vacuum filtration of flocculated iron ore sludge. Powder Technology, 96, 240-247, 1998.
- 6 BESRA, L.; SENGUPTA, D.K.; ROY, S.K.; AY, P. Influence of polymer adsorption and conformation on flocculation and dewatering of kaolin suspension. Separation and Purification Technology, 37, 231-246, 2004.
- 7 BESRA, L.; SENGUPTA, D.K.; ROY, S.K.; AY, P. Influence of surfactants on flocculation and dewatering of kaolin suspensions by cationic polyacrylamide (PAM-C) flocculant. Separation and Purification Technology, 30, 251-264, 2003.
- 8 BESRA, L.; SENGUPTA, D.K.; ROY, S.K.; AY, P. Polymer adsorption: its correlation with flocculation and dewatering of kaolin suspension in the presence and absence of surfactants. International Journal of Mineral Processing, 66, 183-202, 2002.
- 9 BESRA, L.; SENGUPTA, D.K.; ROY, S.K.; AY, P. Studies on flocculation and dewatering of kaolin suspensions by anionic polyacrylamide flocculant in the presence of some surfactants. International Journal of Mineral Processing, 66, 1-28, 2002.
- 10 MOREIRA, A; NUNES, S. Correspondência interna da Samarco. 10p. 2005.
- 11 COTA FONSECA, M. Influência da distribuição granulométrica do Pellet Feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta [manuscrito]./ Maurício Cota Fonseca. Ouro Preto, MG, 2004. ix, 126 f.: il. color., grafs., tabs.; fotos. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais.