

**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**



Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas

**Análise da Viabilidade Econômica da
Reutilização do Fosfogesso no Brasil**

Aluno: Thiago Miagusuku Samos
Orientador: Prof. Dr. José Renato Baptista de Lima

São Paulo
Dezembro/2002

TF-2002

Sa46a

Syano 1439490



M2002D

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005483

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu amigo Professor Doutor José Renato Baptista de Lima, meu orientador, pelo apoio, esforço e paciência, sem o quem não seria possível a realização deste trabalho.

A pós-graduanda Rosana Maria de Macedo Borges, pela ajuda e colaboração, que forneceu a idéia e a experiência na elaboração deste trabalho.

Ao Escritório Piloto de Engenharia de Minas e de Petróleo do Grêmio Politécnico da USP, que me deu o incentivo necessário.

Aos meus pais Flávio e Kazue, aos meus irmãos Caio e Flávia, as minhas avós Efigênia e Luiza e a minha noiva Rebeca Alves Rocha, pelo apoio e incentivo não só durante a realização deste trabalho, mas durante todo o curso de graduação.

A todos os meus colegas, que não só me ajudaram em todos estes anos, tornando o curso muito mais agradável, como perdoaram todas as minhas falhas.

E finalmente a Deus, que me acompanhou em cada passo.

Resumo

O fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), subproduto da indústria de fertilizantes, normalmente é depositado em pilhas, localizadas nas proximidades das usinas de fertilizantes, podendo causar vários danos ao meio ambiente e, sua reutilização, poderá diminuir este impacto ambiental. Como o enxofre, na forma de ácido sulfúrico, é usado como insumo nesta indústria, o objetivo deste trabalho é o estudo da reutilização deste subproduto para a produção de enxofre ou ácido sulfúrico, para diminuição deste impacto ambiental e também para minimizar a importação deste insumo, pois este é importado em quase sua totalidade.

SUMÁRIO

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	v
1. Introdução	1
2. Objetivo	2
3. Revisão da Literatura.....	3
3.1. Industria Nacional de fertilizantes.	3
3.2. Disposição do fosfogesso	3
3.3. O Fosfogesso	5
4. Desenvolvimento	7
4.1. Processo 1 - Recuperação de Ácido Sulfúrico	7
4.2. Processo 2 - Recuperação de ácido sulfúrico e cal	13
4.3. Processo 3 - Produção de Enxofre Elementar	20
Conclusão	23
Referencias Bibliográficas	25

Lista de Figuras

figura 1 – Pilha de fosfogesso localizada na Flórida, Estados Unidos.	5
---	---

Lista de Tabelas

tabela 1 - Condições e Resultados de um Teste Representativo de Sinterização com Pirita	8
tabela 2 - Previsão de custos.....	10
tabela 3 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 1 para enxofre a US\$50.00/t.....	11
tabela 4 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 1 para enxofre a US\$159.27/t.....	12
tabela 5 - Reações Básicas.....	13
tabela 6 - Projeção de custos para o Brasil para o 2º processo	15
tabela 7 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 2 para enxofre a US\$50.00/t para uma produção de 300t/dia de fosfogesso	16
tabela 8 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 2 para enxofre a US\$50.00/t para uma produção de 1200t/dia de fosfogesso	17
tabela 9 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 2 para enxofre a US\$72.91/t para uma produção de 300t/dia de fosfogesso	18
tabela 10 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 2 para enxofre a US\$60.14/t para uma produção de 1200t/dia de fosfogesso	19

1. Introdução

Depois do fim da Segunda Guerra Mundial, a explosão demográfica aumentou a demanda de alimentos, exigindo que a humanidade aprimorasse suas técnicas de cultivo, desenvolvendo variedades geneticamente selecionadas e enriquecendo os solos com a aplicação de fertilizantes, permitindo a obtenção de produtividades elevadas, muito superiores às médias tradicionais.

Porém, o setor industrial ligado à produção de fertilizantes, em especial, o de fertilizantes fosfatados, é um grande gerador de resíduos potencialmente impactantes no meio ambiente, que merece análise detalhada sobre seu potencial de degradação ambiental.

Este setor vem apresentando uma produção crescente nas últimas décadas, destacando-se os países em desenvolvimento, com as taxas mais elevadas de crescimento.

A matéria-prima para a produção destes fertilizantes é o ácido fosfórico, que é obtido no mundo todo basicamente através do “processo úmido”, que consiste no ataque da rocha fosfática com ácido sulfúrico, produzindo uma solução de ácido fosfórico e um subproduto sólido, o sulfato de cálcio, também conhecido como fosfogesso industrial, que é separado por filtração.

Paralelamente, a produção de fosfogesso nas usinas de ácido fosfórico também cresceu, aumentando a necessidade de locais maiores para a sua disposição, aumentando o potencial de degradação do meio ambiente, além de perdas de áreas úteis ocupadas por estes resíduos, além de outras implicações.

Através desse panorama, surge uma necessidade cada vez maior de se reutilizar o fosfogesso de uma forma econômica, tendo como resultado um produto de valor econômico ou um resíduo com menor poder impactante ao meio ambiente.

Este projeto, que originalmente partiu de uma idéia de um trabalho desenvolvido pela mestranda Rosana Maria de Macedo Borges, sob a orientação do Prof. Dr. José Renato Baptista de Lima, visando a caracterização do fosfogesso brasileiro de várias procedências.

2. Objetivo

Este estudo tem como objetivo estudar uma alternativa para a reutilização do fosfogesso industrial ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) para a produção de enxofre ou ácido sulfúrico no Brasil. O fosfogesso é o rejeito proveniente das usinas de produção de ácido fosfórico. Este material é normalmente depositado em pilhas, localizadas nas proximidades das usinas de ácido, podendo causar vários danos ao meio ambiente e, sua reutilização, poderá diminuir este impacto ambiental.

3. Revisão da Literatura

3.1. Indústria Nacional de fertilizantes.

Segundo o DNPM, O Brasil tem cerca de 0,8 % das reservas mundiais de rocha fosfática (298 milhões de toneladas de reservas medidas mais indicadas). O parque industrial brasileiro de rocha fosfática produziu, em 2000, 4.725 mil toneladas de concentrado de rocha (1.687 mil toneladas de nutrientes P_2O_5) com crescimento de 8,8%, 1.843 mil toneladas de ácido fosfórico (923 toneladas P_2O_5) com crescimento de 7,1% e 5.751 mil toneladas de produtos intermediários (1.476 toneladas P_2O_5), com crescimento de 8,7% em relação a 1999, respectivamente. No ano de 2000, os estados de Minas Gerais, São Paulo e Goiás, onde localizam-se as Empresas Fosfertil, Ultrafertil Serrana Fertilizantes e Copebrás, produziram 95,4% (4.508 mil toneladas) da oferta doméstica, com utilização média de 96% da capacidade instalada, da ordem de 5,0 milhões de toneladas/ano.

3.2. Disposição do fosfogesso

O fosfogesso é reutilizado em parte como matéria-prima para construção civil e como corretivo de solos na agricultura. No entanto, sua geração supera o seu uso e assim este precisa ser descartado, processo que pode ser feito depositando-o em rios, oceanos ou em áreas próximas às fábricas.

No caso da deposição em rios ou oceanos, ela pode ser feita por bombeamento, através de emissários, onde é necessário manter o corpo receptor em constante movimento, para evitar o acúmulo do material na saída da tubulação. Este procedimento se torna mais eficiente quando é feito onde haja rápida dispersão do fosfogesso, devido a correntes ou marés, evitando a necessidade de dragagens deste material acumulado no fundo do corpo d'água, para que este não interfira em navegações, sobre o ponto de descarga. Outra forma é a deposição mecânica, onde o fosfogesso, depois de devidamente espessado, é transportado por barcas e depositado em camadas no fundo do corpo receptor.

Em relação a segunda opção, quando a descarga é feita no oceano ao invés de ser feita nos rios, esta possui uma vantagem, devido à maior solubilidade do fosfogesso na água do mar.

Entretanto, isso só é viável quando a usina de ácido fosfórico se localiza perto de rios ou da costa e que ainda não exista obstáculo legal para o uso desta prática. Além disso, essa prática pode implicar num impacto ambiental ainda maior do que a disposição em locais planejados e controlados em terra. Mesmo que o fosfogesso não seja considerado tóxico, ele pode ser considerado moderadamente degradante, pois contém todas as impurezas insolúveis ou pouco solúveis presentes no concentrado de rocha fosfática, como metais pesados, fluoretos e nuclídeos radioativos, assim como alguns resíduos de ácidos, potencialmente lixiviáveis.

Atualmente, a maior parte do mundo realiza a deposição do fosfogesso em áreas próximas às fábricas, para a qual existem duas alternativas: deposição “a úmido” e “a seco”.

Na deposição “a úmido”, o fosfogesso é descartado juntamente com a água residual da unidade na forma de polpa, com um teor de sólidos variando de 5 a 20%, através de bombeamento para lagoas de deposição para sedimentação, onde é decantado e, depois de seco, é acumulado em pilhas por meio de *drag lines*, em áreas especialmente destinadas para tal. As lagoas para sedimentação são limitadas por diques construídos geralmente com o próprio fosfogesso. A água sobrenadante é drenada para lagoas de processo, que atuam como lagoas-pulmão e que coletam águas de chuvas, aguardando a evaporação solar. As mesmas também funcionam como lagoas de resfriamento, para posterior recirculação da água contaminada com fósforo, para reutilização na usina de ácido fosfórico ou para estação de efluentes. Geralmente, existe mais de uma lagoa de sedimentação, de modo que enquanto uma está operando, a outra está sendo preparada para receber mais fosfogesso, através do empilhamento deste após decantação.

Na deposição “a seco”, o fosfogesso é descartado em forma de “torta de filtro”, sendo transportado por correias ou caminhões para a área de deposição final, onde é acumulado em pilhas.

Em ambos os casos, tanto na deposição “a úmido” como na “a seco”, é necessário o emprego de técnicas de impermeabilização dos solos abaixo das pilhas, a utilização de valas de drenagem ou o controle da percolação com o uso de controles de drenagem, para prevenir problemas como a água ácida drenada das lagoas de sedimentação, que além disso, podem conter fluoretos e materiais radioativos que, por percolação no solo, podem atingir lençóis de água subterrânea ou, até mesmo, o risco, não desprezível, do rompimento dos diques de contenção.

Outro fator, associado à deposição em pilhas, é que estas grandes pilhas de cor branca, acizentada ou amarelada são destoantes da paisagem natural, causando um grande impacto visual. Isto pode ser atenuado com o plantio de gramíneas nos taludes das pilhas.

Pode-se observar, portanto, que a deposição do fosfogesso através de qualquer técnica possui implicações significativas de custos e riscos de problemas ambientais.



figura 1 – Pilha de fosfogesso localizada na Flórida, Estados Unidos.

3.3. O Fosfogesso

O fosfogesso, apesar de competir economicamente com o gesso natural em países onde não ocorrem jazidas deste mineral, às vezes tem seu uso inviabilizado, pois em muitos casos há a necessidade de secagem e eliminação de suas impurezas, que são indesejáveis em determinadas aplicações. Outro fator influente é que nem sempre as usinas de ácido fosfórico estão localizadas

próximas do mercado produtor e/ou consumidor de derivados do gesso, tornando o custo de seu beneficiamento muitas vezes inviável.

Porém, quando verificada a viabilidade de sua utilização, normalmente é empregado na área de construção civil e agricultura. Também estão sendo estudadas possibilidades de uso do fosfogesso na produção de vidros com alto teor de cálcio e na sua utilização em aterros para proporcionar uma melhora da decomposição biológica do sistema.

Na construção civil pode ser usado na fabricação de placas, painéis, tijolos e ladrilhos, mas como precisa ser purificado, ele tem que ser calcinado e recristalizado para a forma hemi-hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Pode ser usado também como retardante de pega na indústria cimenteira, como corretivos de solos para melhoria de suas propriedades, como camada final de terraplenagem, reforço base e sub-base de rodovias e aterros.

Na agricultura é usado para reduzir a saturação de alumínio tóxico e como fonte de cálcio para alguns subsolos. É um redutor de alcalinidade e salinidade em solos salinos ou com alto teor de sódio, sendo também uma fonte de enxofre para solos carentes deste nutriente.

Pode também ser usado como fonte de enxofre, pois 68% do enxofre usado como ácido sulfúrico na produção de fertilizantes, fica retido no fosfogesso, sendo que, aproximadamente para cada 6 toneladas de fosfogesso pode-se recuperar potencialmente 1 tonelada de enxofre. O enxofre pode ser recuperado na forma de sulfato de amônio, de ácido sulfúrico ou como enxofre elementar.

Esta é uma alternativa interessante, pois o mercado brasileiro praticamente importa quase a totalidade do enxofre/ácido sulfúrico usado na indústria de fertilizantes. Com isto a indústria Brasileira iria diminuir a importação, que chegou a US\$ 78 milhões em 2000, diminuindo a dependência aos mercados externos.

Foram considerados três principais processos de recuperação de enxofre, descritos sumariamente a seguir.

4. Desenvolvimento

Foram considerados três principais processos de recuperação de enxofre, descritos a seguir. Para a análise econômica dos processos foi considerada os custos e investimentos projetados para o Brasil dos processos descritos.

4.1. Processo 1 - Recuperação de Ácido Sulfúrico

Este processo foi desenvolvido em conjunto pela Davy McKee Corporation (DMC) e pelo Florida Institute of Phosphate Research (FIPR), que desde 1982 têm estudado a utilização do fosfogesso, procurando encontrar um processo prático para a decomposição térmica do fosfogesso, gerando ácido sulfúrico e um co-produto sólido que possa ser vendido.

Este processo incorpora uma mistura de fosfogesso, uma fonte de carbono sólido, argila, pirita e outros aditivos, dependendo dos parâmetros do processo. A mistura é alimentada num forno rotativo, sendo processada nas diferentes fases do forno. O gás resultante, com alto teor de SO_2 , é coletado para uso como gás de alimentação para uma usina convencional de ácido sulfúrico. O co-produto sinterizado, que permanece no forno após a reação, é essencialmente inerte, sendo descarregado por um mecanismo de bandeja inclinada. O estudo relata que o uso da pirita como aditivo, proporcionou uma melhora significativa no processo, pois aumentou muito a concentração de SO_2 nos gases de saída, tanto como a resistência do co-produto, além de conferir a este último propriedades mecânicas e químicas que o tornam suscetível para largo uso como agregado em construção de estradas. O sistema de forno rotativo, que tem sido aplicado com muito sucesso na indústria do ferro e do aço, apresenta vantagens significativas, tanto técnicas quanto econômicas, quando comparado com outros processos sugeridos para a decomposição do fosfogesso.

A tabela 1 demonstra as condições e resultados de um ensaio de sinterização com pirita realizado numa usina piloto da DMC, simulando uma usina de escala industrial. Este ensaio comprova que este processo é tecnicamente viável:

tabela 1 - Condições e Resultados de um Teste Representativo de Sinterização com Pirita

ALIMENTAÇÃO	% Peso (Base Seca)
Fosfogesso (c/ água de hidratação)	56
Carvão	5
Pirita	18
Argila (<i>Phosphatic Slimes</i>)	1
Recirculação	20
Total	100
CONDIÇÕES DE PROCESSO	
Tempo de Secagem	0 min
Tempo de Ignição	0,75 min
Temperatura do Leito	1427 °C
Temperatura do <i>Wind Box</i>	máx. 260 °C
Tempo de Sinterização	17,75 min
Tempo de Resfriamento	1,5 min
Tempo Total	20 min
PRODUTO GASOSO	
Conteúdo Máximo SO ₂ em Volume	16,2 %
PRODUTO SÓLIDO	
Peso da Descarga	22,79 kg
<i>Hearth Free Weight</i>	20,07 kg
Enxofre - <i>Fresh Feed</i>	4,51 kg
Enxofre - <i>Net Product</i>	0,35 kg
Remoção de Enxofre	92,2 %

Adaptação: DMC/FIPR (1982)

No ano de 1995, a FIPR verificou uma melhora no processo de sinterização ao introduzir-se sons de baixa frequência (infra-som) na zona de reação. Isso faz com que a taxa de reação se eleve significativamente, possibilitando a diminuição do tamanho do forno rotativo.

Um dos pontos positivos deste processo é que os metais pesados e os elementos radioativos ficam retidos no agregado resultante do processo, apresentando níveis de emissão bem abaixo dos descritos pelo United States Environmental Protection Agency (EPA).

A tabela 2, mostra uma análise econômica de uma usina localizada em Gulf Coast (EUA), perto de uma usina de ácido sulfúrico, projetada para converter fosfogesso, carvão, pirita e argila, produzindo cerca de 2540 toneladas/dia de ácido sulfúrico e 2282 toneladas/dia de material para agregado. Isso requer um consumo de 3175 toneladas/dia de fosfogesso, 245 toneladas/dia de carvão e 907 toneladas/dia de material pirítico (80% Fe_2S).

A tabela 3 mostra o fluxo de caixa considerando a US\$50.00 a tonelada de enxofre contido no ácido sulfúrico. Este estudo mostrou que esta opção ainda não é economicamente viável com o enxofre com este valor. Para que se tenha uma taxa de retorno equivalente a taxa mínima de atratividade, é preciso que o enxofre chegue a patamares de US\$160.00 a tonelada, como demonstrado na tabela 4. Vale ressaltar, no entanto, que o enxofre neste patamar (US\$50.00/t) é posto no porto. Portanto há de considerar que há um custo de desembarque e transporte do enxofre até a fábrica de ácido sulfúrico. Que não foi considerado neste projeto.

tabela 2 - Previsão de custos

Investimento Total (Milhões de US\$)		75	
Período de Construção (Anos)		2	
Taxa mínima de atratividade (%)		10	
Produção (dias/ano)		330	
Manutenção anual (mil US\$)		1000	
Capacidade da usina (mil toneladas/ano)	ÁCIDO SULFÚRICO	838,239	
	AGREGADO	752,963	
Matérias Primas	Preço Unitário (US\$/Tonelada)	Consumo anual (Mil toneladas)	Custo Anual (mil US\$)
Fosfogesso	0.00	1025	0,00
Pirita	26.13	323	6751,98
Argila	4.41	33	145,53
Carvão	35.05	81	2839,05
Custo de Produção	Preço Unitário ⁽¹⁾ (US\$)	Consumo Horário	Custo Anual (mil US\$)
Energia Elétrica	0.02 / kWh	11000 kW	1742,40
Água	hoje apenas custos de bombeamento	34 m ³	0,00
Combustível de Ignição	3.00 / GJ	40 GJ	792,00
Quadro de pessoal		Salário Médio (US\$)	Custo Anual ⁽¹⁾ (mil US\$)
	44 Operadores	100.00	95,04
	7 Supervisão/Administração	250.00	37,80
	22 Manutenção/Supervisão	150.00	71,28

(1) US\$ 1,00 = R\$3,50

(2) Considerando encargos 1,8

Adaptação: DMC/FIPR (1986)

4.2. Processo 2 - Recuperação de ácido sulfúrico e cal

A decomposição do CaSO_4 ocorre entre 1180°C e 1230°C , pois ao chegar a 1260°C , o sulfato de cálcio começa a sinterizar, diminuindo a taxa de conversão.

As reações básicas á 1200°C estão listadas na tabela 5:

tabela 5 - Reações Básicas

Reações	$\text{Log}_{10} K$	ΔH_R , $\frac{\text{BTU}}{1 \text{ b. Mole}}$
$\text{CaSO}_4 + \frac{1}{4} \text{CH}_4 = \text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{4} \text{CO}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	-3,45	109.900
$\text{CaSO}_4 + \text{H}_2 = \text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	-2,25	88.700
$\text{CaSO}_4 + \text{CO} = \text{CaO} + \text{SO}_2 + \text{CO}_2$	-1,82	75.700
$\text{CaSO}_4 + 4 \text{H}_2 = \text{CaS} + 4 \text{H}_2\text{O}$	-8,01	-37.000
$\text{CaSO}_4 + 4 \text{CO} = \text{CaS} + 4 \text{CO}_2$	-6,21	-88.000
$\text{CaS} + 3 \text{CaSO}_4 = 4 \text{CaO} + 4 \text{SO}_2$	-0,99	391.500

Adaptação: RÜGER, K. F., Alternativas para a destinação do fosfogesso, 1996

O excesso de redutor conduz a uma formação indesejável de CaS , que pode ser eliminado mantendo-se um controle rígido das proporções estequiométricas do redutor. Este equilíbrio é crítico.

O reator é de leito fluidizado de duas câmaras. Na primeira câmara, o material é pré-aquecido e desidratado a 850°C . Já na segunda, se dá a decomposição do sulfato de cálcio à 1220°C . O combustível redutor pode ser sólido ou fluido, mas o gás parece ser o mais adequado.

A combustão parcial do combustível, fornece gases redutores para as reações de sulfato de cálcio. A cal é removida na parte inferior, resfriada e transportada para estocagem. O SO_2 , que sai na parte superior passa por ciclones e trocadores de calor, para retirar as partículas maiores de pó e resfriar o material, respectivamente.

A energia recuperada nos primeiros trocadores de calor é usada para pré-aquecer o ar fornecido ao reator de leito fluidizado. O gás parcialmente resfriado é conduzido a um *scrubber*, onde são removidas as partículas menores de pó e é novamente resfriado. Deixando o *scrubber*, o gás passa por trocador de calor para cair sua temperatura até 38°C . O licor produzido passa por um *stripper*, onde a maior parte do SO_2 dissolvido é drenado. O gás é passado através de um precipitador eletrostático para remover neblina. Em uma torre de secagem, o vapor d'água

remanescente é removido com ácido sulfúrico 93%, por recirculação. O SO_2 passa por uma usina convencional de H_2SO_4 .

Dados referentes ao processo:

- capacidade 300 t H_2SO_4 / dia;
- H_2SO_4 , rendimento em função de CaSO_4 : 93%;
- conversão de SO_2 : 98%;
- concentração máxima do ácido: 98%;
- dimensão das partículas: - 6 + 65 mesh tyler (-3,36 + 0,210 mm);
- velocidade de fluidização: 0,61 m/s;
- densidade do leito fluidizado: 0,48 kg/l e
- razão de alimentação no conversor: 1,625 mol O_2 / mol SO_2 .

Uma característica importante é a recuperação de calor liberado nas reações de redução. O calor dos gases SO_2 é usado para pré-aquecer a matéria prima e o ar de combustão. Isto resulta em economia de 45% de combustível, além de redução de 28% no diâmetro do reator.

O capital investido inicial para a implantação é de US\$ 4,11 milhões e de US\$ 9,45 milhões para usinas de 300 e 1200 t/dia de fosfogesso. Foi assumido um terreno conveniente, edificações mínimas e maioria dos equipamentos para uso específico. No custo está incluído o equipamento para decomposição do sulfato de cálcio, purificação e resfriamento do gás, conversão e absorção do SO_2 , processamento de cal e manuseio de material, mas não o preparo do fosfogesso para alimentação da usina. A substituição do combustível por carvão, para diminuição do custo, pode acarretar diminuição no rendimento.

As tabelas 7 e 8 apresentam que este projeto não é economicamente viável à US\$50.00 a tonelada de enxofre. Com o enxofre à US\$72.91 ou US\$61.14 para produções de 300 e 1200 t/dia respectivamente torna-o viável, como apresentado nas tabelas 9 e 10. Novamente não foi considerado o custo de transporte e de desembarque do ácido sulfúrico, como no processo anterior

tabela 6 - Projeção de custos para o Brasil para o 2º processo

Período de Construção (Anos)			2	
Taxa mínima de atratividade (%)			10	
Produção (dias/ano)			330	
			300 t/dia	1200 t/dia
Investimento Total (Milhões de US\$)			4,11	9,45
Manutenção anual (mil US\$)			200	475
Capacidade (mil toneladas/ano)			99	396
Matérias Primas	Preço Unitário (US\$)	Consumo p/ t H ₂ SO ₄	Custo Anual (mil US\$)	
			300 t/dia	1200 t/dia
Fosfogesso	0.00	1,5 t	0,00	0,00
Custo de Produção	Preço Unitário (US\$)	Consumo p/ t H ₂ SO ₄	Custo Anual (mil US\$)	
			300 t/dia	1200 t/dia
Energia Elétrica	0.02 / kWh	80kWh	158,4	633,6
Água processo	Hoje apenas custo de bombeamento	0,2 m ³	39,6	0,0
Água Resfriamento		53 m ³	1049,4	0,0
Gás Natural	0.05 / m ³	218 m ³	1079,1	4316,4
Quadro de pessoal			Salário Médio (US\$)	Custo Anual ⁽¹⁾ (mil US\$)
	8 Operadores		100.00	17,28
	2 Supervisão/Administração		250.00	10,80
	4 Manutenção/Supervisão		150.00	12,96

(1) US\$ 1,00 = R\$3,50

(2) Considerando encargos 1,8

Adaptação RÜGER, K. F., Alternativas para a destinação do fosfogesso, 1996

tabela 7 - Simulação de fluxo de caixa para o processo 2 para enxofre a US\$50,00/t para uma produção de 300/dia de fosfogesso

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Investimento ⁽¹⁾	2,47	1,64																					
Capital de Giro ⁽²⁾	0,37																						-0,37
Receita																							
Acido Sulfúrico			1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Compensação Financeira ⁽³⁾			0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Custos Operacionais																							
Custo de produção			1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
Folha de pagamento			0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Manutenção			0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Depreciação ⁽⁴⁾			0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Lucro Tributável			-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18
Imposto de renda ⁽⁵⁾			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fluxo de caixa	-2,47	-2,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,39
VPL ⁽⁶⁾	-4,06		TIR	-8,91%	Enxofre		US\$50,00/t																

() considerando vida útil de 20 anos de operação

(1) investimentos divididos em 60% no primeiro ano e 40% no segundo

(2) Capital de giro considerando 3 meses de Custos Operacionais

(3) Compensação financeira 2%

(4) considerando investimento depreciado em 20 anos

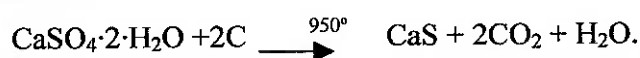
(5) Imposto de Renda de 33%

(6) Valor presente líquido em US\$ considerando taxa mínima de atratividade de 10%

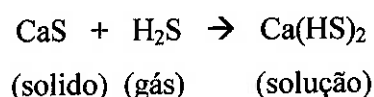
4.3. Processo 3 - Produção de Enxofre Elementar

Segundo Pressinotti, A “U.S. Bureau of Mines” construiu uma usina piloto em 1968 para produção de enxofre elementar a partir de gesso natural, produzindo carbonato de sódio e cloreto de sódio como subprodutos. Teoricamente, fornece 3t de carbonato de sódio para cada tonelada enxofre, a partir de 5,5 toneladas de gesso. Este processo foi projetado para a produção a partir de gesso natural, não o gesso industrial, pois este contém inúmeras impurezas, mas pode ser adaptado.

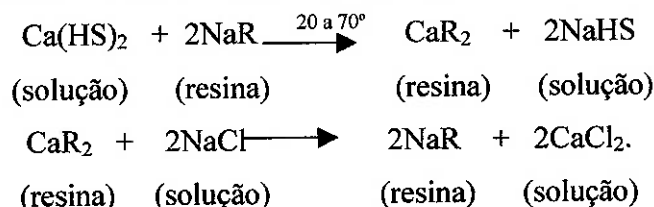
Esta usina usava gesso natural e gás natural para produção de enxofre elementar. As principais reações envolvidas:



A máxima conversão de CaS é obtida entre 800°C e 1000°C, de 20 a 120 min. O CaS é resfriado, moído e misturado com água, e entra em contato com H₂S gasoso, formando o Ca(HS)₂.

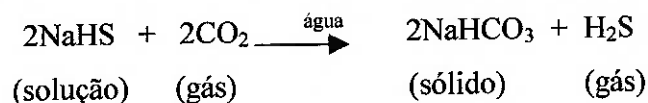


O Ca(HS)₂ é separada dos resíduos não solúveis por sedimentação e filtragem e passa por uma resina de troca catiônica. A resina é regenerada com NaCl.

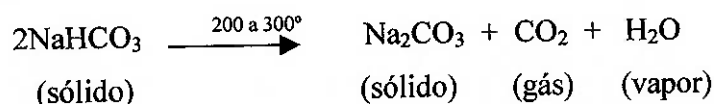


O contato da resina de troca iônica com a solução poderá ter melhor desempenho caso seja usado um contactor de troca iônica, tipo leito compactado, no qual a resina e a solução movem-se em contracorrente. Já a solução deve conter de 2 a 3 equivalentes de Ca(HS)₂.

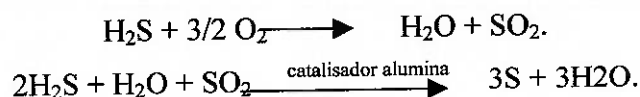
A solução de NaHS é tratada com dióxido de carbono, formando bicarbonato de sódio e gás sulfídrico.



Por calcinação:



O CO₂ seco pode ser reciclado para o estágio de carbonatação do NaHS.



Rendimento teóricos do processos:

- 169 kg de S/t de fosfogesso;
- 560 kg de Na₂CO₃/t de fosfogesso;
- 586 kg de Ca₂Cl₂/t de fosfogesso;

Insumos:

- Água;
- 618 kg de NaCl/t de fosfogesso.
- 127 kg de C/t de fosfogesso.

Hipóteses assumidas:

- capacidade da usina: 118 000 t de S/ano.
- eficiência do processo: 90%
- custo do fosfogesso: zero
- custo do carvão: US\$6.00/t.
- custo de NaCl: US\$3.00/t.
- valor de venda dos subprodutos: zero.
- assumindo rendimento de 90%:

- Carbonato de Sódio (Na_2CO_3): 3,7 t/ t de S;
- Cloreto de Cálcio (CaCl_2): 3,8 t/t de S.

Consumos dos principais insumos:

- carvão: 0,25 t/t de fosfogesso;
- sal: 0,7 a 1,0 t de sal/t de fosfogesso;
- fosfogesso: 6,6 t / t de S.

Custos aproximados:

- custos de investimento: US\$ 20 a 25 milhões;
- custos totais de operação: US\$ 11.00/t de fosfogesso (estão incluídos os preços do carvão e do sal.
- custo da produção do enxofre: US\$ 72.00/t de S.

Conclusão

Estudando a viabilidade econômica e ambiental dos processos de reutilização do fosfogesso descritos no item 5, não é possível concluir um único processo mais viável, pois todos os processos têm prós e contras e existem vários fatores que influenciam a sua viabilidade, tais como:

- capital disponível para investimento;
- preço do produto no mercado internacional (enxofre e ácido sulfúrico).
- legislação ambiental, pois, se o co-produto for disposto no ambiente, este pode apresentar problema similar que está sendo verificado com o fosfogesso;
- localização da usina de ácido fosfórico, pois deve-se levar em conta a possibilidade de consumo local do co-produto, que tem valor agregado baixo.
- a disponibilidade de matérias-primas disponíveis, tais como: gás natural, coque, coque de petróleo, água, pirita, areia, argila, hematita, entre outros.

As conclusões referentes a cada processo estão apresentadas a seguir:

O processo 1 se enquadra bem em locais onde há uma alta produção de fosfogesso, pois ele consome cerca de 3175 toneladas de fosfogesso/dia. No entanto, é necessária uma usina de ácido sulfúrico adjacente a ela, para processar o gás SO_2 e produzir o ácido sulfúrico. A análise desta unidade industrial de ácido sulfúrico não consta no estudo deste trabalho. O sub-produto gerado pode ser empregado na pavimentação de rodovias e seu uso vai depender da localização desta unidade industrial usina para que se possa utilizar este material. Um fator preponderante é o custo do investimento, que chega a US\$ 70 milhões para uma usina de 840.000 toneladas/ano de ácido sulfúrico. Com o preço do enxofre a US\$50.00/tonelada (DNPM, 2001) o projeto torna-se inviável, como pode-se ver na tabela 3. Para que se possa amortizar o investimento, o enxofre teria que chegar a cerca de US\$163.00, no local de seu consumo.

O processo 2 de recuperação de ácido sulfúrico e cal, cujos investimentos iniciais para a implantação são de US\$ 4,11 milhões e de US\$ 9,45 milhões para usinas de 300 e 1200 t/dia de fosfogesso, é o que tem os menores custos de investimento e de produção de ácido sulfúrico. Pode-se verificar que para usina de 1200 toneladas/dia de ácido sulfúrico o projeto torna-se viável com o enxofre a aproximadamente US\$62.00 /tonelada, valor muito próximo do atual,

sendo interessante um estudo mais elaborado, verificando diversos outros fatores não analisados nesta pesquisa. Um fator de grande importância é a limitação dos tamanhos das partículas do fosfogesso gerado, pois o mesmo na entrada do processo deve estar entre -6 +65 #, não reaproveitando todo o fosfogesso de entrada. O co-produto, cal, pode ser reaproveitado, também dependendo da localização da usina.

A recuperação de enxofre elementar (item 4.3) tem um custo de investimento médio, de US\$ 20 a 25 milhões, mas as referências estudadas não disponibilizou dados suficientes para uma simulação mais adequada de fluxo de caixa. Além disto, é mais interessante a recuperação de ácido sulfúrico para o seu reaproveitamento na usina de ácido fosfórico no local. O processo tem como subproduto o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e cloreto de cálcio (CaCl_2), que não possuem valor econômico.

Os custos de água do processo foram considerados apenas como bombeamento. Porém, estuda-se no Brasil estabelecer valor de uso da água. Como tais custos de água estão sendo estudados para questões ambientais e, já que este processo visa reduzir um importante impacto ambiental (disposição do fosfogesso), este custo poderá ser reduzido ou mesmo absolvido.

Vale ressaltar que este valor de enxofre é o preço colocado no porto. No Brasil o custo do frete terrestre é muito elevado e, portanto, o fosfogesso se aproveitado próximo a usina de geração não teria tal custo, tornando o processo particularmente interessante no Brasil.

Referencias Bibliográficas

- ALBUQUERQUE, P. C. W.; BARTL, P. E., Alternativas para reciclagem industrial do fosfogesso. Segundo seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura, Uberaba, 1992, p. 67-81.
- BORN, H.; LIMA, J. R. B., Utilizations of wastes from the phosphate fertilizer industry. Simpósio New horizons in resource handling and geo-engineering, Ube, Outubro 1994.
- DEM/DNPM, Fertilizantes fosfatados naturais. Sumário mineral de 1980 à 1999.
- DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral Home Page, <http://www.dnpm.gov.br/sm2001.html>
- ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRICIDADE DE SÃO PAULO S/A. Home Page, <http://www.eletropaulo.com.br>
- EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS ASSOCIATION Home Page, <http://www.efma.org>.
- FLORIDA INSTITUTE OF PHOSPHATE RESEARCH Home Page, <http://www.fipr.state.fl.us>.
- FREITAS, B. F., A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. Alternativas para reciclagem industrial do fosfogesso. Segundo seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura, Uberaba, 1992, p. 325-339.
- IMC GLOBAL Home Page, <http://www.imcglobal.com>.
- KENDRON T. J.; LLOYD, G. M., Phosphogypsum to sulfuric acid with cogeneration - a competitive edge. Apresentação para o Second International Symposium on Phosphogypsum, Miami, Dezembro 1986.
- KENDRON T. J.; LLOYD, G. M., Phosphogypsum, a source of sulphur dioxide: new signs of life?, Phosphorus & Potassium, n.º 137, Maio-Junho 1985, p. 33-36.
- KENDRON, T. J., Sulfur recovery from phosphogypsum. Proceedings of the phosphogypsum fact-finding forum, Tallahassee, Dezembro 1995, p. 65-72.
- KENDRON, T. J.; LLOYD, G. M.; MARTEN, J. H., Phosphogypsum - a problem becomes a opportunity. Apresentação no American Institute of Chemicals Engineers, New Orleans, Abril 1986.
- LIMA, J. R. B., Aproveitamento do fosfogesso gerado como subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados. Seminário sobre Reciclagem de rejeitos da indústria Mineral-Metalúrgica, Ouro Preto, 1992, p. 425-441.
- LLOYD, G. M.; MARTEN, J. H., Recovery of sulfur values from phosphogypsum. Apresentação no 11th Phosphate-sulfur symposium, Palm Beach, Janeiro 1987.
- MAY, A.; COBBLE, J. R.; SWEENEY, J. W., RI8939 Assessment of phosphogypsum as a constituent of aggregate material.

- MCFARLIN, R. F., Current and anticipated research priorities for the utilization and management of phosphate process byproducts and wastes.
- MORRIS, C. E.; WHELOCK, T. D.; SMITH, L. L., Processing waste gypsum in a two-zone fluidized bed reactor. Apresentação no National meeting of the American Institute of Chemical Engineers, Chicago, Novembro 1985.
- PRESSINOTTI, A. F., Aproveitamento do gesso natural e gesso residual da produção de ácido fosfórico, publicação IPT n.º 1219, São Paulo, 1982.
- RÉ, M. I.; GUARDANI, R.; BRASIL, G. C., Recuperação de enxofre de fosfogesso em leite fluidizado: tratamento matemático.
- RICE, D. A.; CARTER, O. C. JR.; MAY, A.; RAGIN, M. M.; SWANTON, R. G., RI9297 Recovery of sulfur from phosphogypsum: conversion of calcium sulfide to sulfur.
- RÜGER, K. F., Alternativas para a destinação do fosfogesso, São Paulo, 1996.
- SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo Home Page, www.sabesp.com.br
- SOCIETY OF MINING ENGINEERS, INC, Transactions, Littleton, 1989, volume 284, p. 1848-1853.
- THE CHEMICAL ENGINEER' RESOURE PAGE Home Page, <http://cheresources.com>.
- UNIDO, Utilization of the phosphogypsum produced in the fertilizer industry, Maio 1985.
- UNIDO; IFDC, Fertilizer manual, revision of the IFDC/UNIDO Fertilizer Manual published in Dezembro 1979, p. 306-311.
- VALERY JR., W.; CHAVES, A. P., A reciclagem do fosfogesso, rejeito da fabricação do ácido fosfórico. Seminário sobre Reciclagem de rejeitos da indústria Mínero-Metalúrgica, Ouro Preto, 1992, p. 51-71.