

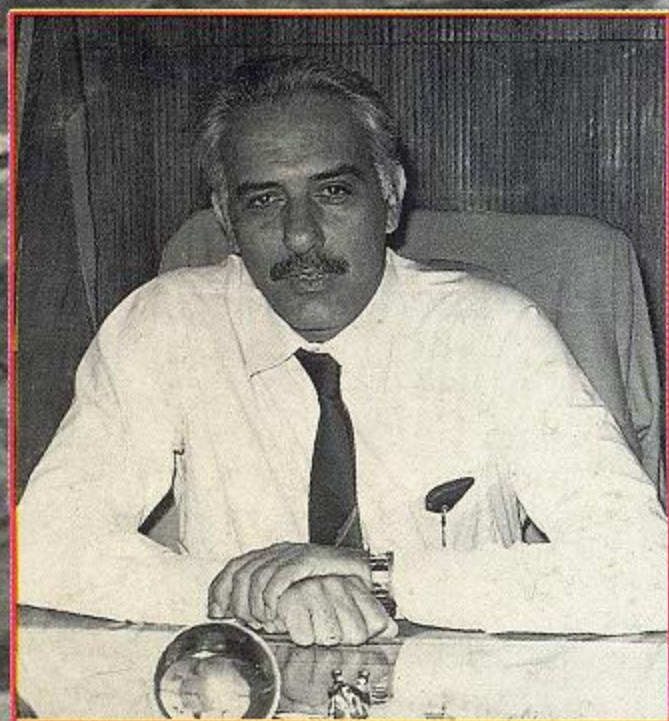
ANO 15 - Nº 167
ABRIL/91
Cr\$ 650,00

minérios

extração & processamento

minerales

extracción & procesamiento



Elmer Prata Salomão
Presidente do DNPM

DNPM

Iniciativas vigorosas
sacodem o *status quo*

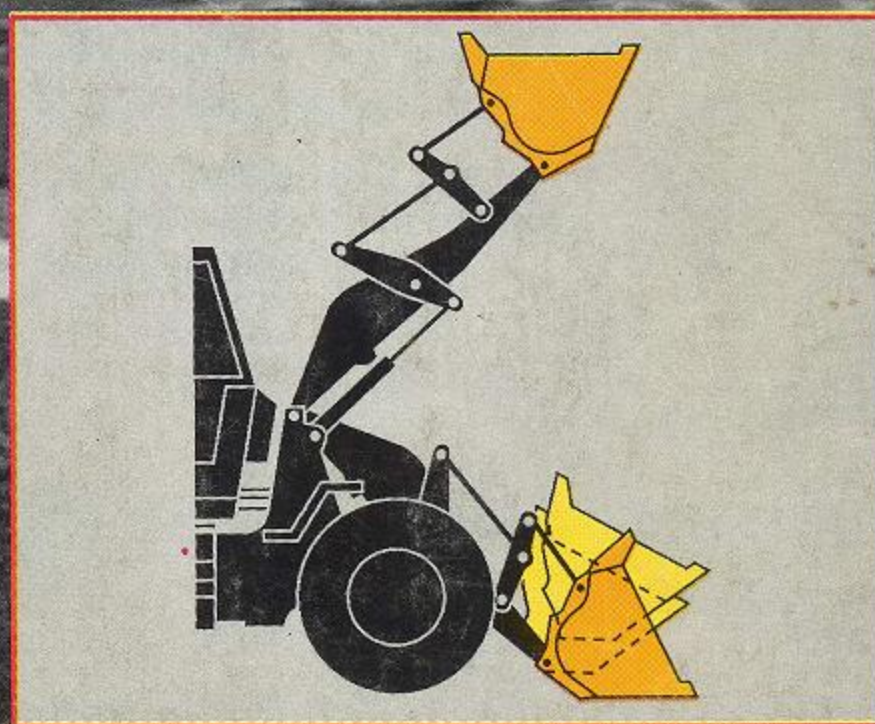
TECNOLOGIA MINERAL

Nova abordagem:
o modelo operacional



CARREGADEIRAS

Até o básico é esquecido
na manutenção



Uma nova abordagem: o modelo operacional

Alexis P. Yovanovic*

A otimização de processos de tratamento mineral — em particular, a britagem, moagem, classificação e flotação — é sempre tratada como “arte”. Após 4 anos de intensas pesquisas, foi desenvolvido, inclusive com auxílio de programas computacionais, o modelamento matemático dessas operações unitárias, incorporando em suas rotinas de cálculos os parâmetros operacionais envolvidos.

Os resultados das otimizações já realizadas em projetos para ouro, cobre, manganês e ferro recomendam o seu emprego, já que na fase ainda de concepção do projeto, resulta em reduções significativas em equipamentos, edifi-

cações, consumo de reagentes e de energia, quando comparada a proposições clássicas.

Em projetos já em operação, obtém-se a simplificação dos circuitos, redução das cargas circulantes e dos custos operacionais.

Em estudos comparativos entre tecnologias convencionais e novas proposições, é uma ferramenta eficaz na seleção do melhor em cada caso. Exemplo: flotação em coluna vs convencional, moagem semi-autógena vs. convencional, etc.

Esta abordagem propõe derrubar alguns “mitos tecnológicos” na tecnologia mineral

Nesta década, as atividades de consultoria na área mineral estão voltadas para a otimização das usinas existentes, procurando maior produtividade e menores custos de operação.

Mas, a falta de clareza científica sobre os fenômenos envolvidos nas operações unitárias da área de tratamento de minérios, permitiu que alguns fabricantes desenvolvessem seus próprios

modelos teóricos, em cima de alguns “mitos”, conseguindo orientar o interesse do minerador para alternativas particulares.

Neste contexto, o Modelo Operacional foi criado, em 1987, tentando ligar o suporte teórico e as ferramentas matemáticas à experiência adquirida durante anos pelos operadores de usinas, abandonando a utilização dogmática dos mitos tecnológicos na área mineral, e retomando o bom senso como a ferramenta principal para enfrentar o dia-a-dia nas usinas de beneficiamento.

O texto a seguir procura esclarecer

resumidamente alguns destes mitos, referentes à flotação e moagem, sob a ótica do Modelo Operacional. A Leme Engenharia, que optou por uma “engenharia de resultados”, procura trazer a foco esta discussão, iluminando algumas zonas de sombra existentes nas operações de beneficiamento.

Introdução

Até hoje, as operações unitárias mais importantes na área de tratamento de

*Engenheiro Civil-Químico, 1973, “Universidad del Norte”, Chile. Consultor Sênior em Tratamento de Minérios, Leme Engenharia Ltda.

La optimización de procesos de tratamiento de minerales, en particular, la molienda primario y secundario, clasificación, y flotación, es siempre tratada como un “arte”. Después de 4 años de intensas investigaciones, fué desarrollado, inclusive con la ayuda de programas computacionales, modelos matemáticos de esas operaciones unitarias, incorporando en sus rutinas de cálculo, los parámetros operacionales involucrados.

Los resultados de las optimizaciones ya realizadas en los proyectos de oro, cobre, magnesio y hierro, recomiendan su empleo, ya que aún en la etapa de

concepción del proyecto, resulta en significativas reducciones de equipos y edificaciones, consumo de agentes reactores y de energía, cuando es comparada con las proposiciones clásicas.

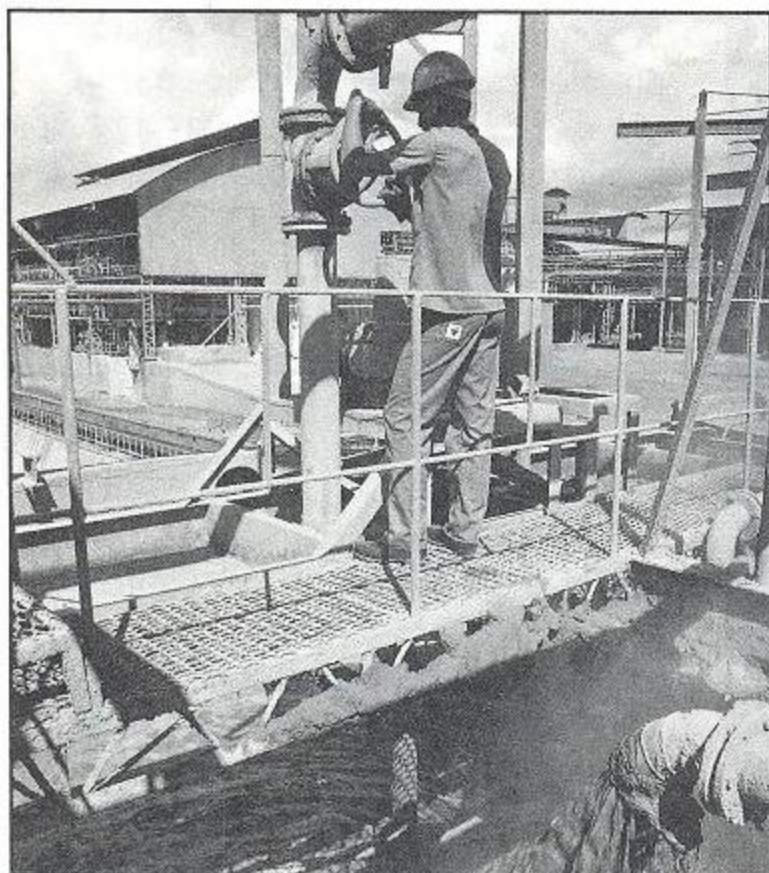
En los proyectos que ya están en operación, se obtiene la simplificación de los circuitos, reducción de las cargas circulantes y de los costos operacionales. En estudios realizados comparativamente entre tecnologías convencionales y nuevas propuestas, es una herramienta eficaz en la selección de lo mejor para cada caso. Por ejemplo en la flotación en columnas versus la convencional, molienda semi autógena versus

convencional, etc..

Este contexto propone derrubar algunos “mitos tecnológicos” para la tecnología de minerales.

En esta década, las actividades de consultoría en el área de minería estarán vueltas para la optimización de las plantas existentes, buscando una mayor productividad y menores costos de operación.

Sin embargo, la falta de claridad científica sobre los fenómenos involucrados en las operaciones unitarias del área de tratamiento de minerales, permitió que algunos fabricantes desarrollasen sus propios modelos teóricos, so-



Na flotação, operador pode concentrar a massa que achar mais conveniente

minérios — moagem e flotação — são consideradas, direta ou indiretamente, uma “arte” pelos autores mais conhecidos dentro da comunidade técnico-científica mundial (2,3,4).

O grande vazio existente entre os fundamentos teóricos e a prática dessas operações unitárias tem sido preenchido, durante mais de 80 anos, pela utilização dogmática de inúmeros “mitos tecnológicos”. Estes mitos são os detalhes que impedem a visão do todo, e correspondem a determinadas fórmulas empíricas, tabelas indicadas nos catálogos e até algumas “dicas” tradicionalmente utilizadas na indústria mineral, que procuram responder ao que se desconhece com certos “fatores de correção”.

Num trabalho-diagnóstico feito há algum tempo pelo Autor (5), são apre-

bre algunos “mitos” consiguiendo orientar el interés de los mineros para las alternativas particulares.

En este contexto, el modelo operativo fué creado en 1987, tentando unir el soporte teórico y las herramientas matemáticas a la experiencia adquirida durante años por los operadores de plantas, abandonando la utilización dogmática de los “mitos tecnológicos” en el área de minería, retomando el buen senso como la herramienta fundamental para enfrentar el día a día en las plantas de beneficiamiento.

El texto descrito a continuación, procura esclarecer resumidamente al-

sentados os mitos tecnológicos mais comuns na área de tratamento de minérios, os quais fazem parte de uma série de mais de 30 “fatores de inviabilidade”, que durante décadas têm inibido o nosso desenvolvimento técnico e econômico. Aspectos tais como a utilização de circuitos-fechados, fatores de projeto etc., têm contribuído para que um país latino-americano hoje utilize cerca de 43% a mais do investimento que qualquer país desenvolvido, além de 17% a mais de custo operacional (5,27).

Estes mitos passaram a ser enfrentados por laboratórios de pesquisa tecnológica, universidades, empresas de consultoria e de mineração, objetivando desmistificar a tecnologia mineral (1,6).

Dentro dessa filosofia, foi desenvolvido o Modelo Operacional.

O Modelo Operacional

Fenômeno Natural vs. Fenômeno Real

No Processamento de Minérios, encontramos diversas dificuldades que não têm permitido um melhor conhecimento dos seus mecanismos básicos de ocorrência, e, por consequência, têm limitado o estudo de modelos de simulação de processos, impedindo a obtenção de correlações simples entre estudos de laboratório e a operação contínua industrial.

Em muitas operações unitárias, a ocorrência do fenômeno natural não se

gunos de estos “mitos” referentes a la flotación y molienda, bajo la óptica del Modelo Operacional.

La empresa Leme Engenharia, que optó por una “ingeniería de resultados”, puesto que busca discutir esta cuestión, iluminando algunas de las zonas sombrías que existen en las operaciones de beneficiamiento.

Introducción

Hasta hoy, las operaciones unitarias más importantes en el área de tratamiento de minerales - molienda y flotación - son consideradas, ya sea directa o indirectamente como un “arte” por los autores

encontra necessariamente representada pela atuação real do processo. No caso particular de flotação, o fenômeno natural acontece “para cima”, onde o transporte seletivo de massa desde a polpa forma uma espuma enriquecida de substância de interesse (para o caso de flotação direta), mas, o concentrado é apenas aquela quantidade parcial de espuma efetivamente retirada da célula de flotação. De pouco servirão as experiências de laboratório, em células tipo *batch*, se na prática, dentro de certos limites, o operador concentra a massa que julga conveniente em uma etapa determinada do processo.

Por outro lado, o processo de moagem, como sistema, envolve principalmente três funções simultâneas: a própria cominuição — que é o fenômeno principal ou natural — a classificação granulométrica e o transporte macromolecular. O comportamento real do processo irá depender da atuação operacional sobre as últimas duas funções; que definem a retirada efetiva do produto e seu regime no estado estacionário.

Deste modo, o mecanismo real das operações unitárias têm sempre dois componentes: o Natural e o Operacional. Este último não tem sido considerado adequadamente pelos modelamentos convencionais.

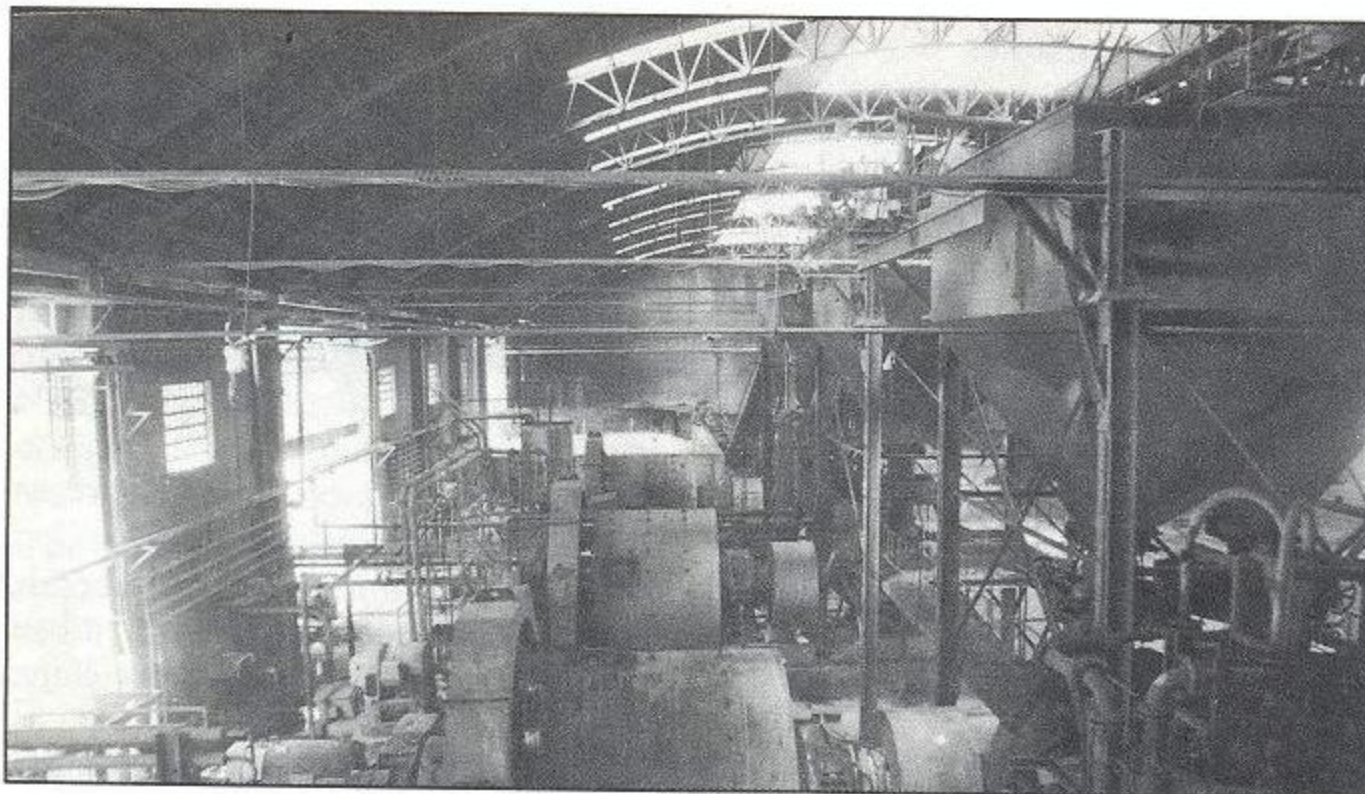
A Nova Abordagem

O Modelo Operacional, além de levar em conta o mecanismo “real” de ocorrência das operações, introduz três novos conceitos na área mineral:

1. A transferência de massa, como fenômeno de transporte, é interpretada de maneira macromolecular, onde a “migração” forçada de partículas (força

más conocidos dentro de la comunidad técnico-científica mundial (2,3,4).

El grán vacío existente entre los fundamentos teóricos y prácticos de esas operaciones unitarias, ha sido llenado, durante 80 años, por la utilización dogmática de innumerables “mitos tecnológicos”. Estos mitos son los detalles que impiden tener una visión del todo, y corresponden a determinadas fórmulas empíricas, tablas indicadas en los catálogos y hasta algunas “ideas” tradicionales utilizadas en la industria de minería, que buscan responder lo que se desconoce con ciertos “factores de corrección”.



Moagem depende de funções como a retirada efetiva e o regime estacionário

hidrofóbica, peso específico, tamanho, etc.) substitui o conceito de "difusão" molecular, utilizado na Engenharia Química.

2. A descrição do processo no estado estacionário é feita a partir de equações de continuidade, criadas especialmente pelo Modelo Operacional, que permitem abrir as tradicionais "caixas pretas" dos circuitos fechados ou processos em etapas.

3. A otimização dos processos é baseada em "atuações operacionais", que levam o fenômeno real até condições próximas de sua ocorrência natural.

Em resumo, o Modelo Operacional é uma nova ferramenta teórica que permite a interpretação, avaliação, simulação e otimização dos processos minerais, e que nasceu de uma nova concepção dos fenômenos envolvidos.

A Estrutura do Modelo

O Modelo Operacional foi criado, em

1987 (7), incorporando a operação dos processos dentro das equações matemáticas que descrevem seu modelamento. É o bom senso e a experiência dos operadores que entra finalmente nas discussões.

Este modelo baseia-se em determinados princípios (definições conceituais das operações) que limitam o espaço de atuação das expressões teóricas ou empíricas, e de três leis (expressões matemáticas simples) que descrevem:

1ª Lei: O fenômeno fundamental, ou propriedade macrofenomenológica, e seu *scale-up*. (Ex: o Índice de Cominuição, na operação de moagem).

2ª Lei: Equação de Continuidade, que descreve o processo no estado estacionário (descrição do processo e não o mero resultado dele).

3ª Lei: Equação de Otimização, que orienta a obtenção do Padrão Operacional Otimizado do processo (redução de custos de operação).

Modelo operacional

Fenômeno natural versus fenômeno real

En el proceso de minerales, encontramos diversas dificultades que no han permitido un mejor conocimiento de sus mecanismos básicos de ocurrencia, y que por consecuencia, han limitado los estudios de modelos de simulación de procesos, impidiendo la obtención de simples correlaciones entre estudios de laboratorio y la continua operación industrial.

En diferentes operaciones unitarias, la ocurrencia del fenómeno natural no

Esta ferramenta operacional e de projetos está sendo colocada à disposição das empresas mineradoras, objetivando a otimização de processos e a redução de custos.

Concentração de massas por flotação

A flotação é a operação unitária de tratamento de minérios que apresenta maior desencontro entre a prática industrial e os aspectos teóricos. Modernos e sofisticados equipamentos de controle automático confrontam-se com um processo que, paradoxalmente, é considerado "uma arte" pelos autores mais especializados no tema.

A fabricação de equipamentos de grande tamanho, com sofisticados elementos de controle, tem evoluído com maior velocidade que sua capacidade de aproveitamento em benefício do processo. Células "gigantes" ou de "colunas", sistemas de análises químicas *on line* (tipo Courier) e modernos sistemas computadorizados de controle integral de processos (tipo Honeywell), convivem com operações que continuam a ter caráter essencialmente artesanal.

Os problemas da avaliação e controle de processos são em alguns casos bastante contraditórios. Sabe-se de muitas plantas industriais de flotação que controlam o processo completo como uma grande "caixa preta", supondo uma relação direta entre a alimentação e os produtos finais (rejeito e concentrado), assumindo portanto que a "operação" do circuito é função invariável ou ao menos não significativa sobre

se encuentra necesariamente representada por la actuación real del proceso. Para el caso particular de la flotación, el fenómeno natural ocurre "para arriba", donde el transporte selectivo de material desde la pulpa, forma una espuma enriquecida de sustancias de interés (para el caso de la flotación directa), siendo que el concentrado es apenas una parcial cantidad de espuma efectivamente retirada de la celda de flotación. Muy poco pueden servir en las experiencias de laboratorio, en celdas tipo "batch", si en la práctica, dentro de ciertos límites, el operador concentra el material que juz-

En un trabajo diagnóstico realizado hace algún tiempo por el autor, son presentados los mitos tecnológicos más comunes en el área de tratamiento de minerales, los cuales hacen parte de una serie de más de 30 "factores de inviabilidad", que durante décadas han inhibido nuestro desarrollo técnico y económico. Aspectos como el de circuitos cerrados, factores de proyecto etc., han contribuido para que un país Latino americano utilice hoy cerca de 43% a más, de la inversión que cualquier país desarrollado, además de 17% a más de costo operacional (5,27).

os resultados metalúrgicos da planta.

A atuação exercida pelo operador, implica num desvio da ocorrência natural do processo, afetando os resultados metalúrgicos. O modelamento matemático convencional destes fenômenos apresentará então sérias dificuldades no *scale-up*, por estar baseado unicamente no fenômeno natural.

De acordo com o Modelo Operacional (12), o processo será otimizado na medida que as atuações operacionais acompanhem a naturalidade do fenômeno, aproximando o processo a seu funcionamento teórico em continuidade, como se fosse uma só etapa.

Deste modo, o Modelo Operacional afirma que a operação de plantas de flotação não é uma arte, e sim uma técnica bem definida em seus conceitos práticos e susceptível de predição desde as investigações no laboratório.

As teorias clássicas da flotação

Existem diversas abordagens teóricas para descrever o processo de flotação, todas elas do tipo "cinético" (17), onde a definição macroscópica do fenômeno baseia-se numa analogia com os processos químicos. Entretanto, a investigação teórica de processos a seu modelamento matemático, tem avançado unicamente na direção do fenômeno natural e, no momento de levá-lo à prática, reconhecem que o processo real é ainda "uma arte".

A título de exemplo, reproduzem-se a seguir algumas citações bibliográficas correlatas:

ga conveniente en una etapa determinada del proceso.

Por otro lado, el proceso de molienda, como sistema, envuelve tres funciones principalmente simultaneas: la propia conminución - que es el fenómeno principal o natural - la clasificación granulométrica y el transporte macromolecular. El real comportamiento del proceso irá a depender de la actuación operativa sobre las dos últimas funciones, que definen la efectiva retirada del producto y su régimen en el estado estacionario.

De este modo, el real mecanismo de las operaciones unitarias siempre tie-

SME -MINERAL PROCESSING PLANT DESIGN

Mular, Bhappu, Editors
2nd. Edition, 1980

"As flotation is still largely an art, flotation tests must be planned by experienced flotation engineers" ... (pág. 155).

"Although there is a scientific basis for flotation separations, it is still an art" (pág. 193).

SME - MINERAL PROCESSING HANDBOOK

N.L. Weiss, Editor, 1985

"A major purpose of kinetics studies lies in applications to circuit design and control. Although the topic is intensively studied, it is still in a research stage" (pág. 5-96).

"It has often been said that flotation is more of an art than a science" (pág. 30-96).

SME - DESIGN AND INSTALLATION OF CONCENTRATION AND DEMARTERING CIRCUITS

Andrew L. Mular/Mark A. Anderson - Editors, 1986.

"In our opinion, this is where a major difficulty exists, since flotation simulation models are based on a knowledge of feed distribution with respect to rate constants, and these rates parameters do not scale-up from laboratory to plant, at the present time" (pág. 427).

"Flotation kinetic scale-up is not possible at present" . (pág. 428).

Alguns mitos tecnológicos

nen dos componentes: el natural y el operacional. Este último no ha sido considerado adecuadamente por los modelos convencionales.

Un nuevo contexto (punto de vista)

El modelo operacional, además de tomar en cuenta el mecanismo "real" de las ocurrencias operativas, introduce tres conceptos nuevos en el área de minería:

1. La transferencia de masa, como fenómeno de transporte, es interpretada de manera macromolecular, donde la "migración" forzada de partículas

O Circuito "Scavenger"

O síndrome do "circuito fechado", doença tradicional dos engenheiros de processo e inteligente ferramenta de incremento nas vendas de equipamentos, é aplicado na flotação com o nome de *Scavenger*. No caso da flotação direta, este circuito significaria dar uma segunda oportunidade ao rejeito esperando produzir mais concentrado. As vezes, é denominado como *Rougher 2*, quando utilizado na etapa de desbaste.

Na prática, o volume útil deste circuito é normalmente da mesma magnitude que o próprio *Rougher*, ou seja, quase 30% de equipamentos adicionais dentro do circuito total da usina, incrementando desnecessariamente o tamanho do prédio e necessidades de bombeamento.

Experiências concretas de aplicação do Modelo Operacional têm demonstrado o efeito inócuo do *Scavenger*, naqueles circuitos que não possuem operação de remoagem do produto recirculado (10,14). Além disso, foi possível comprovar uma redução de quase 30% no consumo de espumantes ao operar o circuito sem *scavenger*(15).

A Densidade da Polpa

Prognosticando uma maior "seletividade" em polpas diluídas, tradicionalmente têm sido recomendado pelos fornecedores de equipamentos a utilização de baixa percentagem de sólidos na flotação, particularmente nos circuitos de limpeza. Esta orientação obrigaria, na etapa de projeto, a superdimensionar as necessidades de equipamentos de flotação a fim de manter o tempo de residência necessário para esta operação.

Na figura 1, (13), pode-se observar o

(fuerza hidrofóbica, peso específico, tamaño, etc.) reemplazan el concepto de "difusión" molecular, utilizado en la Ingeniería Química.

2. La descripción del proceso en estado estacionario es hecha a partir de ecuaciones de continuidad, creadas especialmente por el Modelo Operacional, que permiten abrir las tradicionales "cajas negras" de los circuitos cerrados o procesos en etapas.

3. La optimización de los procesos es basada en "actuaciones operacionales", que llevan el fenómeno real hasta condiciones próximas de su ocurrencia natural.

comportamento da viscosidade de uma polpa de minério de cobre, à temperatura ambiente, em função da percentagem de sólidos e granulometria. De acordo com a Figura, comprovada com experiências do Autor (16), a seletividade de polpas na faixa de 45 a 50% de sólidos não apresenta nenhuma diferença com respeito a polpas mais diluídas, permitindo uma importante economia em equipamentos e tamanho do prédio industrial.

As Células de Coluna

Especial cuidado deve ser tomado no processo de avaliação da performance de células não convencionais. Ensaios de células de coluna foram realizados há pouco tempo no Brasil, em experiência piloto, onde os consultores externos que coordenaram os ensaios concluíram que, este tipo de células, tiveram melhor performance metalúrgica em comparação às células convencionais.

O modelo operacional foi utilizado na avaliação dos mesmos ensaios, concluindo em contrário, como foi posteriormente comprovado (14).

Cominuição em moinhos de bolas

A cominuição até hoje constitui-se no maior item de investimento e de custo de operação dentro de uma usina convencional. Por este motivo, seu estudo teórico e desenvolvimento tecnológico tem sido uma grande preocupação dos centros de pesquisa, universidades, empresas de engenharia, fabricantes de equipamentos de mineração e das próprias empresas produtoras. Este esforço tem se traduzido de modo muito mais marcante na área de fabricação do equipamento do que na compreensão dos fenômenos fundamentais.

Até hoje, os modelamentos conhecidos no processo de cominuição, voltados à moagem em moinhos tubulares, são do tipo macrofenomenológico (17), os quais podem, por sua vez, serem classificados como "Energéticos" (Bond, Rowland, etc.), ou "Cinéticos" (J. Herbst, Austin, Linch, etc.).

O Modelo Operacional (18) foi desenvolvido a partir de uma nova concepção macrofenomenológica do processo, o Índice de Cominuição, o qual,

diferentemente dos modelamentos convencionais, incorpora os aspectos operacionais da moagem (nível de enchimento de corpos moedores, percentagem de sólidos, velocidade de rotação, etc.).

As teorias clássicas da moagem

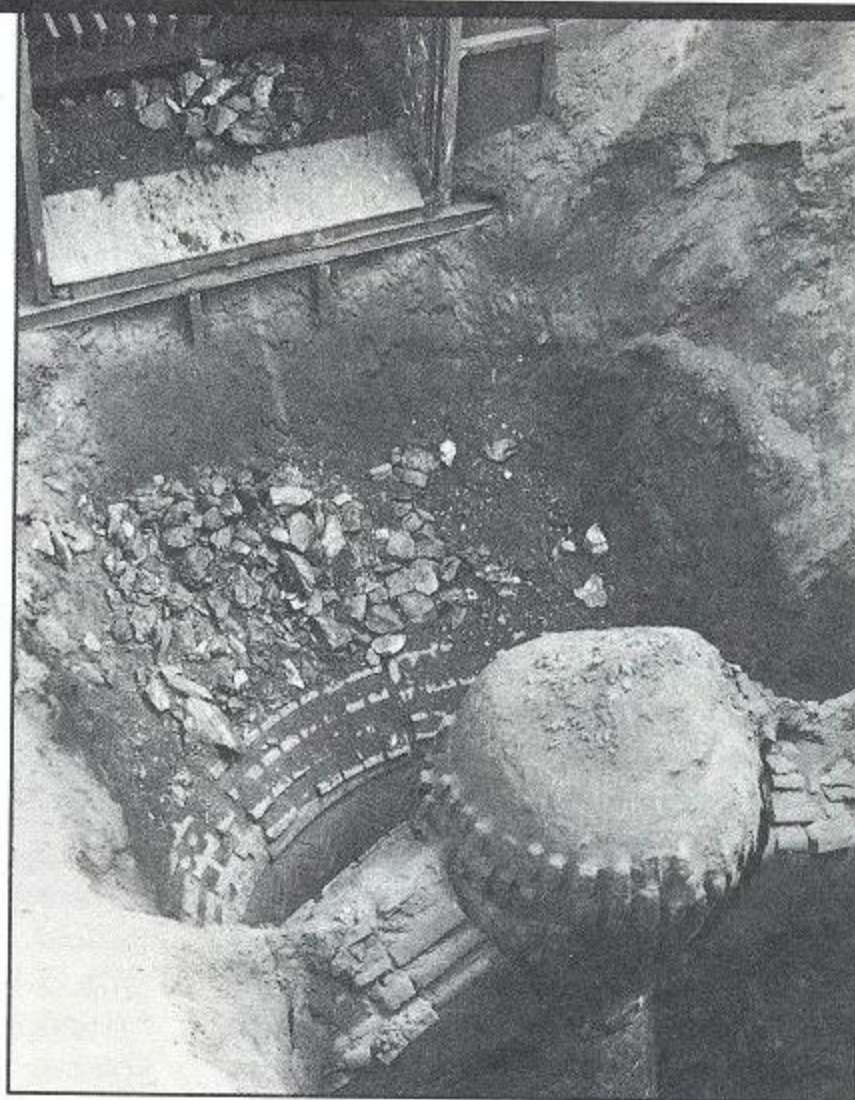
A abordagem "energética" do fenômeno, idealizada por Bond (2,3) é a mais empregada atualmente para projetar instalações de moagem, mas, esta interpretação macrofenomenológica, pelo fato de basear-se em condições padronizadas de operação (alto nível de enchimento de bolas, velocidade crítica definida, carga circulante fixa, etc.), não possui fundamento teórico que permita a otimização operacional do processo.

A evolução deste tipo de modelamento baseia-se cada vez mais em fórmulas empíricas, que pretendem corrigir as naturais diferenças entre os parâmetros obtidos no laboratório e o *scale-up* industrial.

Por outro lado, os modelamentos do tipo "cinético" ainda não evoluíram o suficiente para oferecer alternativas práticas de simulação e otimização. Mas, apresentam um grande desenvolvimento teórico e esforço experimental, a nível de laboratório, para tentar definir sua particular concepção do fenômeno, como se este fosse de natureza química, o que não é verdade (7).

Durante muitos anos os centros de pesquisas e universidades têm procurado compreender, interpretar e simular matematicamente o processo de moagem pela via cinética, objetivando, através do aprofundamento teórico, criar uma ponte entre os trabalhos de laboratório e as operações industriais. Este esforço não tem ainda uma adequada resposta prática, como é reconhecido em numerosas publicações técnicas.

A comercialização de modelamentos cinéticos sob a forma de software, parece ter maior ênfase na venda de equipamentos de controle automático, embora não de forma absoluta.



É um erro crasso considerar que a otimização dos processos é obra de arte

Alguns mitos tecnológicos da moagem

O Circuito Fechado

A utilização de circuitos fechados de moagem é comumente aceita, e é produto de uma tradição da própria determinação dos parâmetros energéticos do modelo de Bond. O fechamento do circuito encontra, como única justificativa, uma tabela utilizada por fabricantes de equipamentos, que definem fatores de ineficiência dos circuitos que pretendem ser projetados para operar em aberto (2,3). Por exemplo, este fator aumenta arbitrariamente em 20% o consumo específico de energia possível de obter em moinhos operando em circuito aberto, em comparação com o circuito fechado, quando a referência de controle granulométrico é baseada em P80 (80% de partículas abaixo do tamanho P), sem levar em consideração o nível de enchimento de corpos moedores.

O Modelo Operacional discorda radicalmente da validade deste "mito tecnológico", e tem observado (e aplica este conceito nas suas rotinas de cálculo) que existe classificação hidráulica como fenômeno auxiliar dentro do próprio moinho, fenômeno este que foi comprovado industrialmente na moagem de minério de ferro em moinho de bolas *single-stage* (19). A performance

deste moinho, operando em circuito aberto com 22% de enchimento de bolas, foi comparada com a dos moinhos da instalação original da usina, operando no clássico sistema fechado.

Ao contrário do sugerido pelos fabricantes, foi demonstrado que o novo moinho, operando em aberto, consome quase 22% a menos de consumo específico de energia que os outros moinhos operando em circuito fechado (7,9 kWh/ton vs. 10,22 kWh/ton). O novo moinho, ademais, apresentou uma redução de 33% no consumo de revestimento e 14% no consumo de bolas. Tudo isto avaliado, em detalhe, durante cinco anos contínuos de operação.

É importante destacar que o Modelo Operacional tem comprovado que, nas instalações de britagem o circuito aberto pode atender com sucesso as necessidades de cominuição de uma usina, ainda com 16% a menos de investimento em relação ao circuito fechado (28).

Nível de Enchimento de Bolas

Dependendo de condições próprias do minério, da operação e características mecânicas do moinho, o Modelo Operacional demonstra que existe um ponto ótimo para o nível de enchimento de bolas. Um caso específico industrial foi simulado no computador e representado graficamente na Figura 2. Outras simulações para diferentes minérios, condições operacionais e tamanhos de moinhos, concluem que o valor ótimo de enchimento para a carga de bolas encontra-se normalmente na faixa de 16 a 25%.

Nenhum dos modelamentos convencionais demonstra esta importantíssima conclusão. Pelo contrário, a utilização de altos níveis de enchimento (38 a 40%) é de uso corrente nos projetos de instalações industriais, prejudicando, nas comparações técnico-econômicas, as alternativas convencionais de moagem.

A prática normal de moagem, na Alemanha Oriental, considera o nível de enchimento de bolas na faixa de 22 a 30% (20), enquanto nos Estados Unidos o valor médio observado é próximo de 36% (3).

A Velocidade de Rotação

Até hoje, os fabricantes de equipamentos impõem uma determinada fração de velocidade crítica, segundo o diâmetro

do moinho, de acordo com outra tabela por eles adotada (2,3), que não indica as razões desta nova arbitrariedade.

Em análise computacional, o Modelo Operacional foi testado para diferentes níveis de enchimento e condições de operação, demonstrando que existe uma velocidade de rotação ótima para cada diâmetro de moinho. Na Figura 3 é mostrado graficamente o resultado da simulação feita em computador, para dezenas de condições diferentes. Pode-se observar que existe nitidamente um ponto crítico, a partir do qual o consumo específico de energia, por tonelada adicional de material alimentado, praticamente é duplicado de forma significativa.

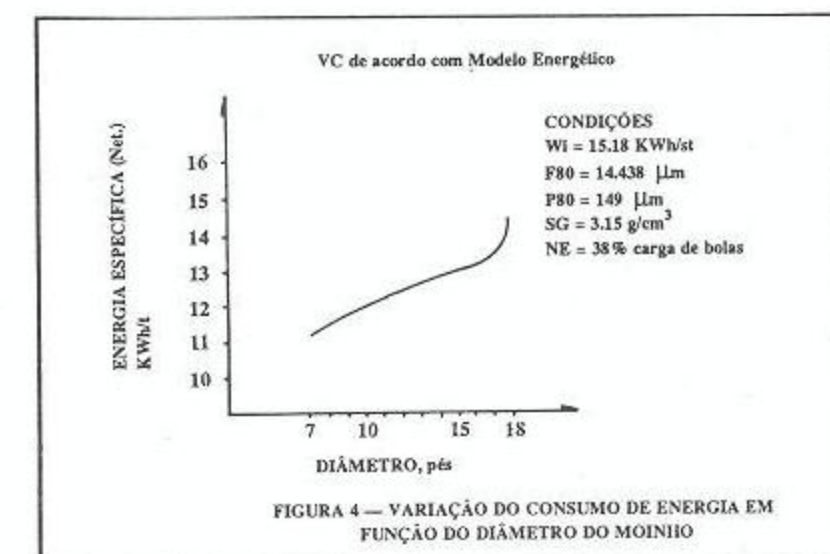
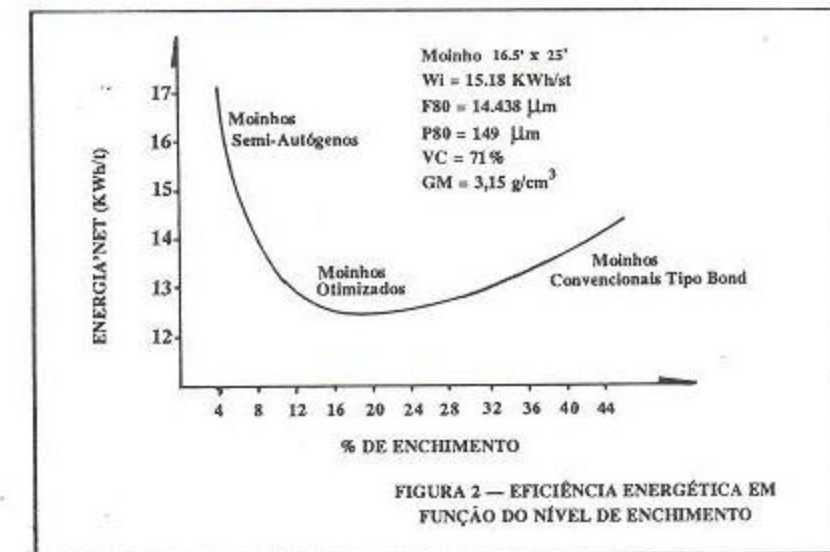
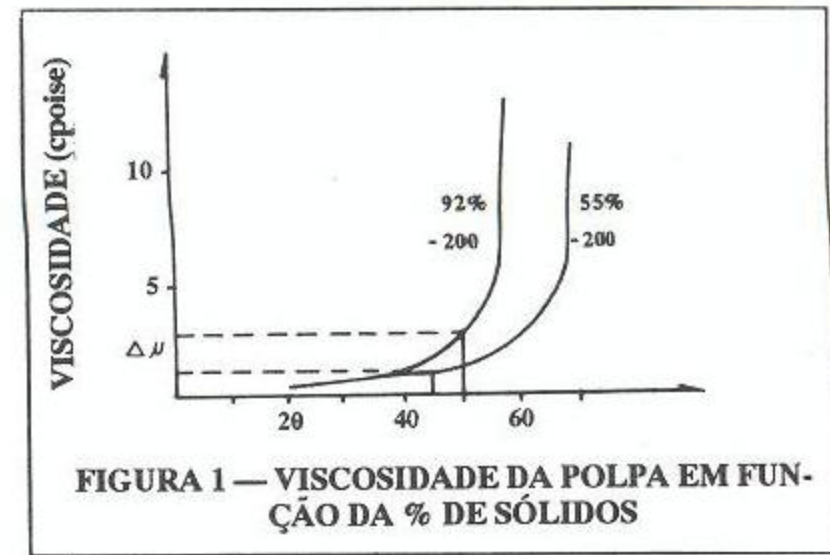
Na mesma simulação observou-se que, para todos os diâmetros considerados, existe um valor mínimo de consumo específico de energia quando o moinho gira a 58% da sua velocidade crítica.

Da observação desta figura podemos entender, também, uma das razões pelas quais os moinhos de Bouganville, Nova Guiné, (21,22,23), de 18 pés de diâmetro, que tem operado acima de 80% da sua velocidade crítica, como recomendado por alguns consultores, apresentam alto consumo específico de energia em relação aos valores projetados.

O Diâmetro do Moinho

A análise conjunta do custo de investimento e de operação, normalmente conclui que é preferível considerar um moinho grande em vez de dois pequenos, dentro do limite máximo de diâmetro acima do qual a energia é desperdiçada (18). Por outro lado, considerações técnicas acerca da construção e montagem mecânica de moinhos de grande diâmetro, assim como a disponibilidade de peças de desgaste e motores elétricos dentro de cada país, definem os limites práticos do tamanho do moinho.

A abordagem energética do modelamento do processo, a partir da experiência de Bond, apresenta no projeto Bouganville seu principal fracasso técnico, como tem sido duramente criticado pelos partidários do modelamento cinético ou populacional (23). No nosso entender, o diâmetro máximo, segundo as características do minério e necessidades de cominuição, foi ultrapassado (18 pés de diâmetro) e, segundo foi comentado no item anterior, a velocidade crítica do moinho é muito superior ao valor



estimado pelo Modelo Operacional.

A abordagem energética do fenômeno, idealizada por Bond, é aperfeiçoada com um novo fator de correção adotado por fabricantes de equipamentos (2,3), que atribui maior eficiência energética à medida que o diâmetro do moinho aumenta. Simulações feitas em computador, utilizando a fração de velocidade crítica sugerida pelos fabricantes, demonstram que, ao contrário do indicado por eles, a eficiência energética varia de maneira inversamente proporcional ao aumento do diâmetro do moinho (aumenta o consumo específico de energia), como é mostrado na Figura 4.

Moinhos Semi-Autógenos

O consumo unitário de energia pode ser até 25% superior para os sistemas semi-autógenos quando comparados com sistemas convencionais de britagem e

TECNOLOGIA MINERAL

moagem (24), o qual é confirmado na simulação mostrada na Figura 2, para baixos níveis de enchimento (4 a 8%).

O grande impulso comercial apresentado pelos sistemas semi-autógenos ou autógenos de moagem, no começo da década de 70, tende agora a diminuir. Isto se deve, principalmente, por razões de custo de energia elétrica a qual, dependendo da área geográfica considerada, sofreu um aumento de quase 4 a 5 vezes em seu valor nestes últimos 20 anos (25).

Nas comparações feitas entre sistemas convencionais vs. semi-autógenos, muitos consultores externos utilizam o método do *net power* para verificar os parâmetros energéticos em experiências piloto, favorecendo notoriamente as alternativas semi-autógenas (14).

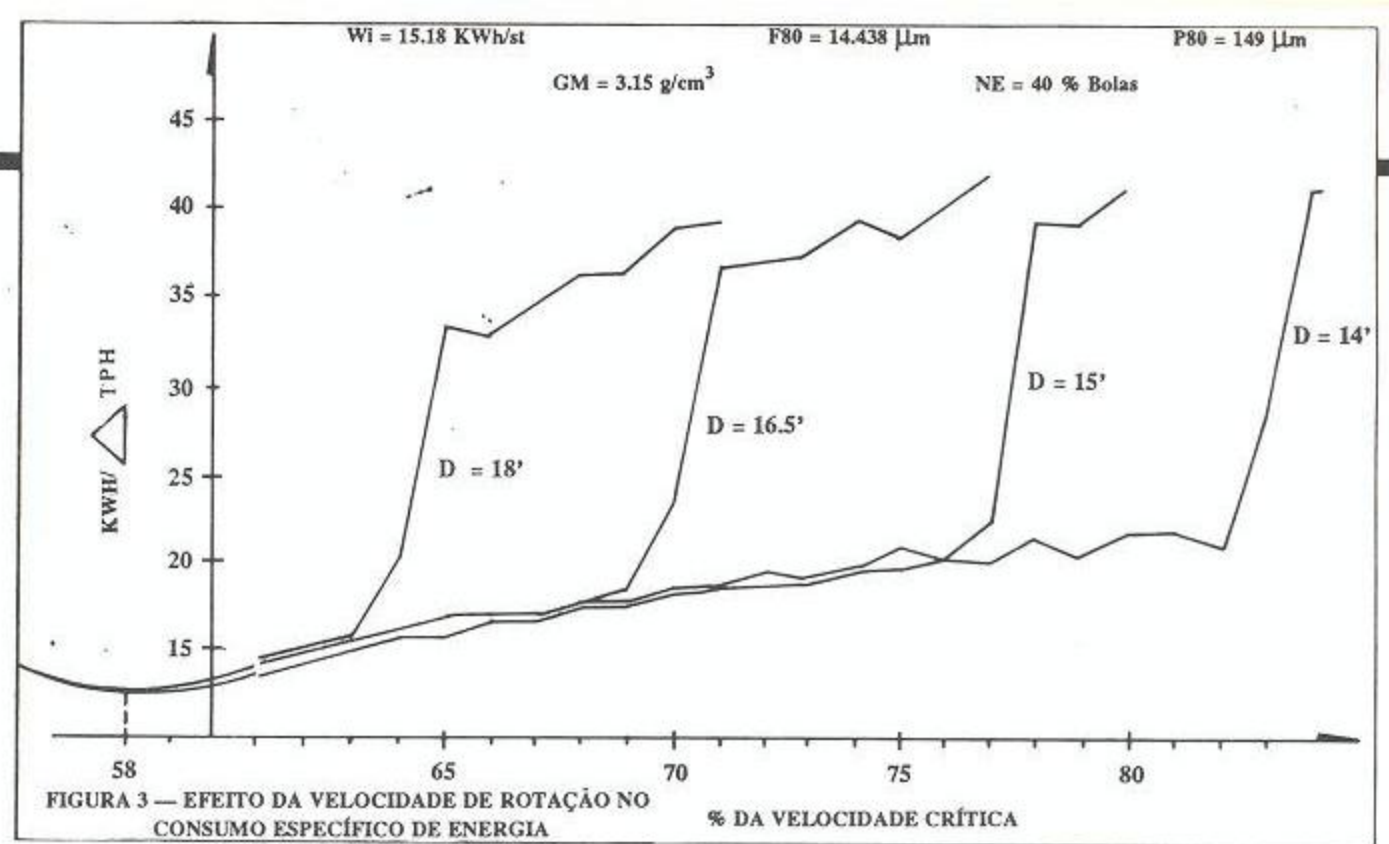
Altas Cargas Circulantes

Para circuitos fechados de moagem o Modelo Operacional tem demonstrado que, segundo a granulometria pretendida para o produto, a carga circulante do sistema teria que variar entre 50 a 100%, como máximo.

O excesso de carga circulante observado em alguns circuitos de moagem, deve-se simplesmente ao erro hidráulico do próprio sistema de classificação, cuja combinação *apex/vortex* deve ser satisfeita hidráulicamente ao se atingir o estado estacionário. O que muitas vezes passa despercebido é que o classificador impõe sua performance ao moinho, e não ao contrário, como deveria ser.

Lembramos que, só a bomba centrífuga que alimenta ao hidrociclone, para altos níveis de carga circulante, consome entre 1 a 1,5 kWh/t de minério processado pelo moinho. Por outro lado, a redução da carga circulante traz consigo um incremento na densidade da polpa do *overflow*, reduzindo as necessidades de espessamento, maximizando os tempos de residência nas operações unitárias posteriores, e reduzindo o consumo e bombeamento de água dentro do processo.

Na abordagem teórica proposta pelos modelamentos energéticos, diversas fórmulas empíricas têm sido desenvolvidas na tentativa de calcular a carga circulante ótima no processo de moagem em circuito fechado, todas elas muito fora da realidade, como mostrado na Tabela I, onde é apresentada uma comparação entre os valores calculados



pelo Modelo Operacional e por uma das fórmulas utilizadas pelos seguidores do modelo energético de Bond: (Tabela I)

Segundo os dados reais de operação, para o primeiro caso o moinho apresentou melhor performance com menor carga circulante (94%), próxima do valor calculado pelo Modelo Operacional. Para o segundo caso, é evidente que a alternativa energética de cálculo apresenta um resultado absurdo.

A Dupla Ciclonagem

Um dos mitos tecnológicos mais recentemente divulgado pelos fabricantes de hidrociclones, na tentativa de melhorar a performance da classificação do circuito fechado de moagem, é a dupla ciclonagem. Pretende-se, em resumo, o uso de mais um equipamento para tentar corrigir o erro hidráulico do equipamento atual.

O que acontece com o segundo ciclone, na realidade, é uma redução da carga circulante do circuito, trazendo consigo os benefícios óbvios deste fato. Algumas usinas de beneficiamento de fosfato, no Brasil, têm conseguido efeito similar unicamente inclinando o ciclone existente, mudando desta forma a distribuição hidráulica *overflow/underflow*. A mesma solução foi adotada no projeto Bouganville (26).

A solução proposta pelo Modelo Operacional é definir a carga circulante "necessária" para o sistema, segundo o erro de classificação interna do próprio moinho, e sugerir a instalação de classificador adequado, que permita retornar ao moinho só aquela fração de massa.

Conclusões

Devido ao exposto, há que realizar um grande esforço para melhorar a abordagem técnica no estudo das operações unitárias com o objetivo da criação de tecnologias próprias para a realidade latino-americana, que em muitos casos requerem apenas um maior entrosamento entre os profissionais que investigam, os que projetam e os que operam.

A venda de "homens/hora" terá que mudar para a venda de "engenharia de resultados". O Modelo Operacional pode converter-se na ferramenta tecnológica esperada durante tantos anos pelos operadores de usinas.

Agradecimentos

O Autor deseja agradecer e destacar o incentivo recebido na preparação deste trabalho e sua divulgação no setor mineral. Para citar apenas alguns, que há anos batalham pelos mesmos ideais de desenvolvimento tecnológico nacional, destacamos: Arthur Pinto Chaves, Ivan Caetano Machado, Márcio Jardim Paixão e Roberto Villas Boas. Finalmente, o reconhecimento à Leme Engenharia, na pessoa do seu Superintendente de Mineração e Metalurgia, Ivan Maia Mosci, pelo seu apoio nesta redação e trabalho atual de renovação do pensamento e atitudes vigentes, na área de consultoria de engenharia, para mineração e metalurgia.

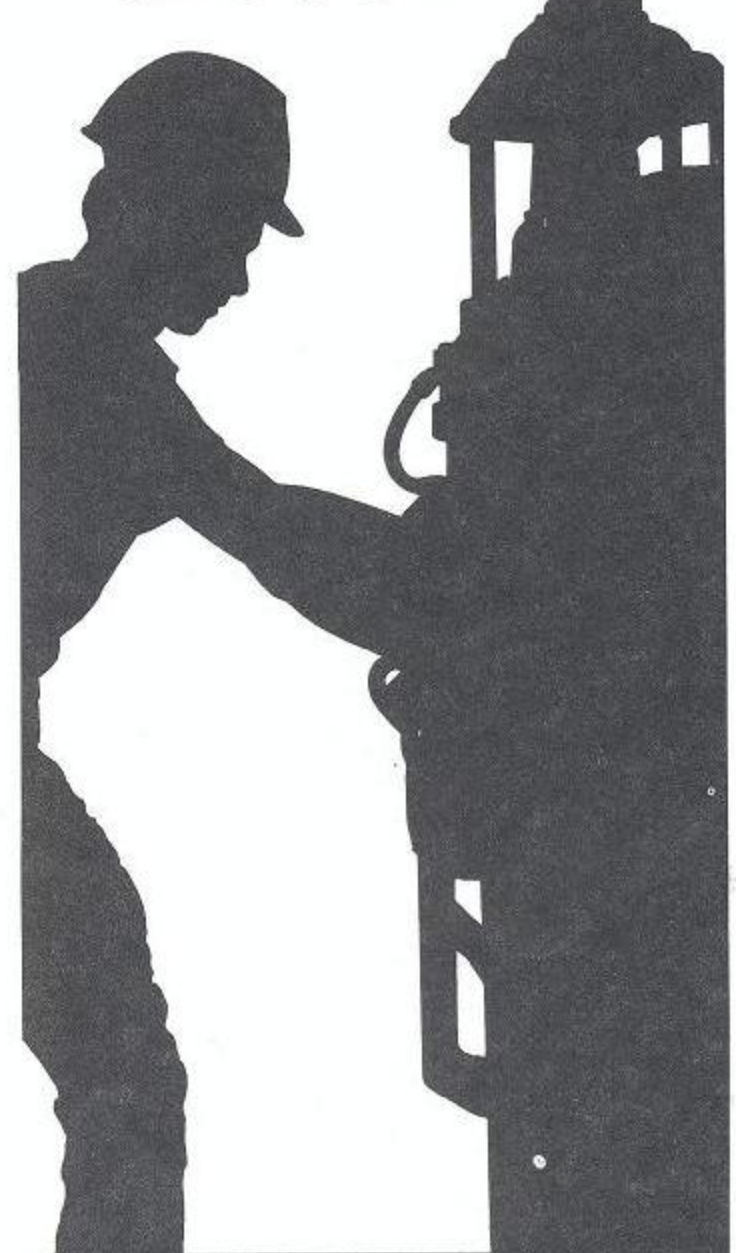
TABELA I - CARGA CIRCULANTE ÓTIMA VS. OPERAÇÃO REAL

| Moinho | Modelo Energético | Modelo Operacional | Operação Real |
|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| 16.5' x 25' (15) | 513% | 72% | 94 até 429% |
| 21.' x 31.7' (19) | 466% | 0% | Aberto |

Bibliografia

1. A.L. MULAR e R.B. BHAPPU, *SME Mineral Processing Plant Design*, 2ª Edição, New York, 1980.
 2. N.L. WEISS, *SME Mineral Processing Handbook*, New York, 1985.
 3. G. BARBERY, M. BOURASSA e A. MAACHAR, "Laboratory Testing for Flotation Circuit Design", in: *SME - Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits*, New York, 1985.
 4. A.P. CHAVES, Entrevista Pessoal, *Revista Brasil Mineral*, janeiro 1989.
 5. A.P. YOVANOVIC, "Como Melhorar a Viabilidade dos Projetos de Mineração na América Latina", Trabalho-diagnóstico, relatório interno CVRD/SUTEC, janeiro 1989.
 6. R. VILLAS BOAS, "Nova Política do CETEM", entrevista pessoal, *Gazeta Mercantil*, 07 de março, 1989.
 - 7.* A.P. YOVANOVIC, "O Modelo Operacional. Nova Interpretação Macrofenomenológica para Operações Unitárias na Área de Tratamento de Minérios", (Relatório pessoal, que dá origem aos desenvolvimentos matemáticos já publicados para Flotação e Moagem), Belo Horizonte, 1987.
 8. A.P. YOVANOVIC e M.R. DRUMOND, "Recuperação de Finos de Minério de Ferro - Modelo Operacional Aplicado à Concentração de Massas por Flotação", 6ª Semana de Estudos Mineiros — UFOP, 1988.
 9. A.P. YOVANOVIC, L.R. FREITAS e M.R. DRUMOND, "Concentração de Massas por Flotação: Análise Prática Conforme o Modelo Operacional", 1º Seminário de tecnologia na CVRD, Belo Horizonte, 1991.
 - 10.** M.R. DRUMOND, "Estudo de Recuperação de Finos Gerados na Mina Casa de Pedra", Relatório Paulo Abib Engenharia, 1988.
 11. A.P. YOVANOVIC e L.R.FREITAS, "Mass Concentration by Froth Flotation: Application to the Copper Industry", Congresso COPPER 91, Ottawa, Canadá, agosto 1991.
 12. A.P. YOVANOVIC, *Concentración de Masas por Flotación*, em processo de edição.
 13. A.P. YOVANOVIC e H.P. MOURA, "Nova Concepção Macrofenomenológica da Cominuição em Moinhos de Bolas", Relatório pessoal, resumo do qual foi apresentado ao 1º Seminário de Tecnologia na CVRD, 1991.
 - 14.** A.P. YOVANOVIC, *Serviços de Consultoria à Companhia Vale do Rio Doce, Projeto Cobre Carajás*, 1987.
 - 15.** A.P. YOVANOVIC, *Visita Técnica e Assessoria de Processo à Mineração Caraiba Ltda.*, 12-20 de setembro 1988.
 - 16.** A.P. YOVANOVIC, *Relatórios Pessoais, Operação da usina de flotação "Colon" da Codelco-Chile, Divisão El Teniente, Chile*, 1974-1980.
 17. A. BROUSSAUD, "Advanced Computer Methods for Mineral Processing: Their Function and potential Impact on Engineering Practices", in: *XVI International Mineral Processing Congress*, Edited by E. Forssberg, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1988.
 - 18.* A.P. YOVANOVIC e H.P. MOURA, *Software para Dimensionamento e Otimização de Moinhos de Bolas*, Relatório Pessoal, 1990.
 19. B. FORSUND, I. NORKYN, K.L. SANDVIK e K. WINTHER, "Sydvarangers 6.5 m diameter x 9.65 m Ball Mill", in: *XVI International Mineral Processing Congress*, edited by E. Forssberg, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1988.
 20. L.G. AUSTIN, R.R. KLIMPEL e P.T. LUCKIE, *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*, AIME, 1984.
 21. N. ARBITRER e C.C. HARRIS, "Scale-Up and Dynamics of Large Grinding Mills. A case study", in: *Design and Installation of Comminution Circuits*, Edited by A.L. Mular and G.V. Jergensen, Society of Mining Engineers of the AIME, New York, 1982.
 22. C.A. ROWLAND, "Large Ball Mills — Length and Diameter", in: *XVI International Mineral Processing Congress*, edited by E. Forssberg, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1988.
 23. Y.C. LO, J.A. HERBST, K. RAJAMANI e N. ARBITRER, "Design Considerations for Large Diameter Ball Mills", in: *International Journal of Mineral Processing, Recent Advances in Comminution*, Edited by K. Rajamani and J.A. Herbst, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, April 1988.
 24. D.J. BARRAT e M.A. SOCHOCKY, "Factors which Influence Selection of Comminution Circuits", in: *Design and Installation of Comminution Circuits*, Edited by A.L. Mular and G.V. Jergensen, Society of Mining Engineers of the AIME, New York, 1982.
 25. J.C. MOTZ, "Types and Characteristics of Common Crushing Plant Flow Sheets", in: *Design and Installation of Comminution Circuits*, Edited by A.L. Mular and G.V. Jergensen, Society of Mining Engineers of the AIME, New York, 1982.
 26. D. ORWE e D. NOREEN, "Horizontal Cyclone Plant Trials at Bouganville Copper Limits". *The AusIMM Cobar Branch Third Mill Operators' Conference*, Cobar NSW, 71-84, May 1988.
 27. A.P. YOVANOVIC, "A Tecnologia Mineral e o Desenvolvimento Econômico dos Países Latino-americanos", apresentado para publicação na *Revista Escola de Minas — REM*, Imprensa Universitária, UFOP, 1991.
 - 28.** A.P. YOVANOVIC, *Serviços de Consultoria para Mineração URUCUM LTDA.*, 1989-1990.
- * Relatórios Pessoais** Documentos Privados das Empresas

SONDAGEM PADRÃO GEOSOL



- Sondagem rotativa testemunhada.
 - Sondagem rotativa e roto-pneumática.
 - Sondagem de testemunhagem contínua-circulação reversa.
 - Perfilagem geofísica dos furos de sonda.
 - Determinação da atitude dos furos com DDI-Fotobor ou Tropari.
- Trinta e cinco anos de trabalhos voltados para a pesquisa do subsolo nacional. Técnica e eficiência, garantidas pelo padrão Geosol de sondagem.



GEOSOL
Rua Aimorés, 200
Fone: (031) 221-5566 - Telex: (31) 1786
CEP: 30 140 - Belo Horizonte - MG