

A PRIMEIRA LEI DE CONCENTRAÇÃO (Modelo Operacional) - FLOTAÇÃO

A primeira Lei Operacional do processo de “Concentração de Massa por Flotação” é utilizada para converter o mecanismo natural de captura e flotação numa operação real de concentração de massas, e estabelece que:

$$R = f(R_{cm})$$

R, é a recuperação metalúrgica do processo, definida como:

$$R = [C] / [A]$$

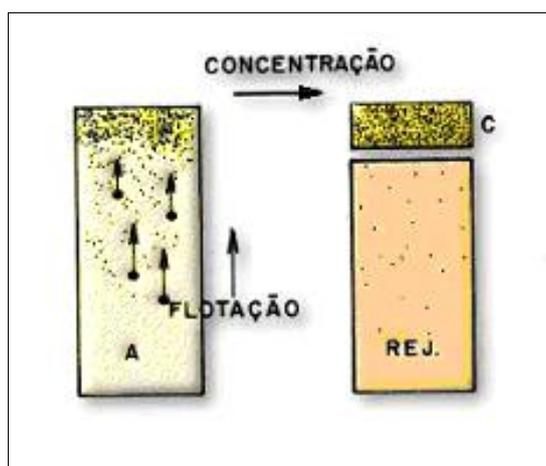
Onde [A] e [C] representam as distribuições de substância de interesse no material alimentado (polpa) e no concentrado (espuma), respectivamente.

Define-se um novo termo: Rcm, ou “Razão de Concentração de Massa”, que exprime a proporção entre a massa total alimentada “A” e a massa flotada e efetivamente retirada de uma célula de flotação “C” (a Rcm é o valor inverso do chamado “SPLIT”):

$$R_{cm} = A / C, \text{ SPLIT} = C / A$$

A expressão **R = f(Rcm)** será denominada igualmente “Equação de Seletividade” ou de “Concentração”, e os mecanismos macroscópicos definidos serão introduzidos como consequência da sua utilização. Esta 1a Lei é válida para um tempo de residência não inferior ao requerido pelo fenômeno natural de flotação. Ao mudar o conceito de tempo entre operações em batelada com respeito a operações contínuas, perde-se o controle sobre o “tempo”, prejudicando as abordagens cinéticas convencionais do processo.

Com a ajuda da 1a Lei, os resultados metalúrgicos podem agora ser medido na mesma base (laboratório e usina) permitindo o scale-up entre ambas as operações. Na Figura é ilustrada visualmente a Primeira Lei do modelo, mostrando a conversão do fenômeno de flotação natural numa operação macroscópica real de concentração.



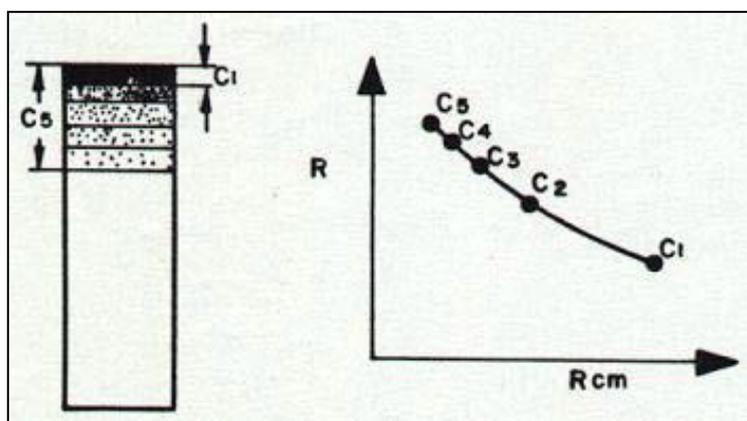
Primeira Lei do Modelo Operacional de concentração de Massa

Observando esta figura podemos compreender que, ao contrário do que é afirmado na literatura conhecida, o processo de concentração de massa numa usina de flotação depende fundamentalmente da atuação física do operador.

Acomodando as comportas ou válvulas de descarga de uma célula ou banco de células de flotação e a alimentação de ar (forçada ou autoinduzida), é possível “operar” o circuito e, dentro de certas limitações, concentrar a massa que julgar conveniente. Podem-se obter altos teores de concentrado (com baixa recuperação metalúrgica) retirando da célula a camada superior de espuma – operação “suave”. Por outro lado, pode-se apressar o circuito e retirar uma maior quantidade de massa, com maior recuperação, ainda que com menor teor no concentrado final – operação “rápida”.

CURVA DE SELETIVIDADE NO LABORATÓRIO (BATELADA)

Para o controle de processos industriais deve tomar-se uma amostra representativa da alimentação da etapa ou circuito avaliado, e extrair em laboratório um mínimo de 3 a 5 alíquotas de concentrados parciais e construir um gráfico da forma ilustrada na **Figura** abaixo.



Traçado Experimental da Curva de Seletividade

A expressão gráfica da 1ª Lei operacional, chamada de Curva de Seletividade, permite numerosas aplicações no laboratório e na usina industrial de flotação; além disso, possui diversas vantagens frente às abordagens cinéticas convencionais.

A Curva de Seletividade é muito bem definida, considerando que as condições do material, liberação, reagente são as mesmas e, principalmente, é respeitada a Lei de Conservação de Massa, de modo que os teores químicos de concentrado, alimentação e rejeito, definem bem a partição de massa.

Duas condições podem então ser avaliadas:



Avaliação de seletividade entre condições diferentes

Exemplo 1: Flotação de minério de Cobre no laboratório

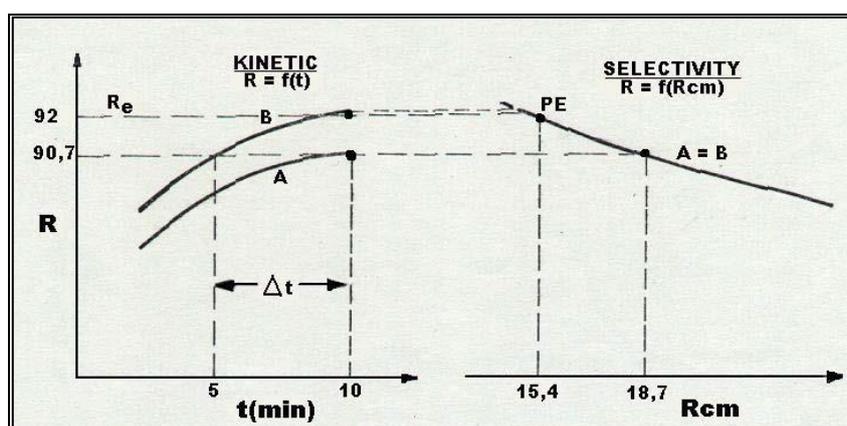
São tiradas cinco espumas em teste padrão de laboratório. Num teste foi utilizada baixa agitação (menor “cinética”) e no outro a agitação foi mais intensa.

PRODUTO	ENSAIO 1		ENSAIO 2	
	Massa, g	Teor, % Cu	Massa, g	Teor, % Cu
<i>c</i> ₁	64,417	22,40	72,287	19,70
<i>c</i> ₂	14,337	3,80	18,727	2,85
<i>c</i> ₃	10,157	1,95	16,107	1,20
<i>c</i> ₄	5,477	1,30	7,447	0,85
<i>c</i> ₅	4,227	1,15	4,237	0,70
Rejeito	1.738,91	0,09	1.705,227	0,08
AF	1.837,525	0,917	1.831,032	0,972

Utilizando as fórmulas clássicas é determinado R e Rcm

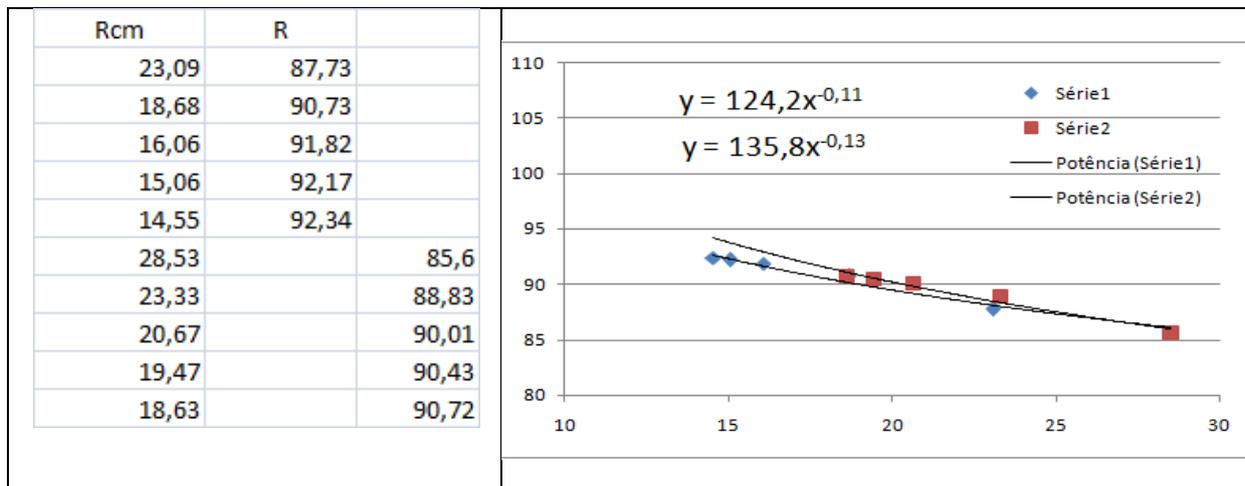
Tempo (min)	ENSAIO 1		ENSAIO 2	
	R, %	Rcm	R, %	Rcm
2,5	85,60	28,53	87,73	23,09
5,0	88,83	23,33	90,73	18,68
7,5	90,01	20,67	91,82	16,04
9,0	90,43	19,47	92,17	15,06
10,0	90,72	18,63	92,34	14,55

Observe-se que o ensaio 2, mais enérgico, obteve em 5 minutos praticamente a mesma recuperação obtida no teste 1 em 10 minutos, o que prova a independência do fenômeno em relação à cinética. E, o mais surpreendente, com a mesma Rcm, ou seja, a seletividade do material é a mesma, como ilustrado na Figura abaixo.



O fator (**R x Rcm**) é o "scale-up" entre o laboratório e a etapa Rougher, e é a opção de trabalho do operador dentro da Curva de Seletividade que o fenômeno natural oferece. Ou seja, mais uma vez fica claro que a flotação natural é “administrada” pela operação para atingir os resultados metalúrgicos pretendidos. Diferentemente das análises de laboratório convencionais, que levam em conta apenas o teor do concentrado, a análise de seletividade pela via da massa (Rcm) independe de diferenças triviais nos teores alimentados, da forma mostrada em exemplo anterior (0,917 y 0,972 %Cu) e como é usual na prática industrial.

Graficando R vs. Rcm, para ambos os testes:

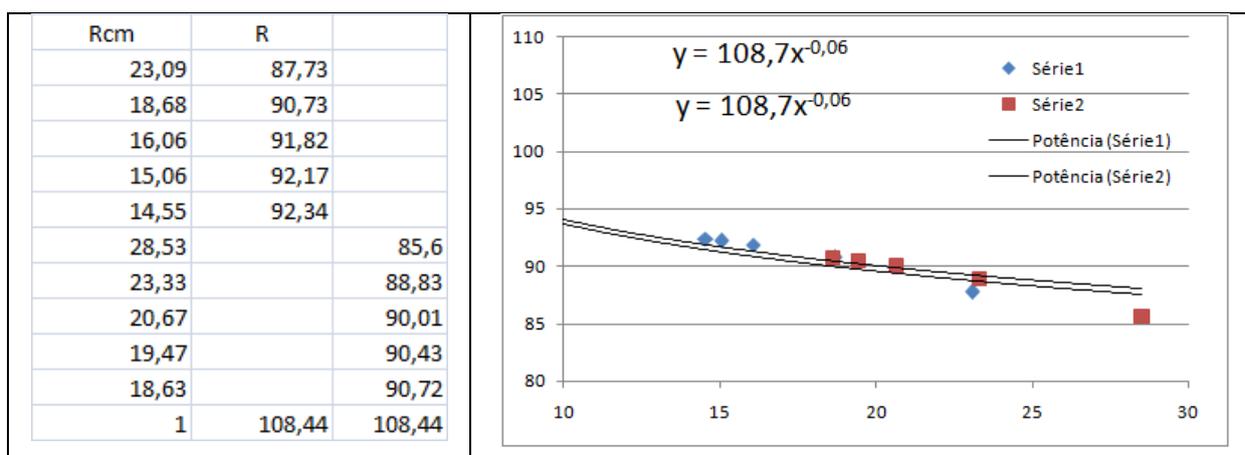


Os gráficos apontam para diferente ALFA, onde a curva corta o eixo vertical (valor de R para Rcm = 1) e a seletividade pareceria ser quase a mesma.

Para contarmos com uniformidade de critério, o modelo estabeleceu um ponto teórico similar no eixo R, ou seja, um **valor constante de ALFA**. A rigor, nenhum processo de flotação se aproxima tanto assim do eixo onde Rcm seja próxima de 1 (pois isso significaria que 100% da massa foi flotada), de modo que considerar um valor constante de ALFA permitiria avaliação mais efetiva entre testes, usinas e até minério diferentes, uniformizando BETA como índice de seletividade para qualquer processo de concentração.

Meses de trabalho industrial, ao implantar sistema avançado de controle para flotação de sílica (Usina de Vargem Grande, VALE), obtivemos o valor de 108,44 como média para ALFA e, até agora, temos usado esse valor para obtermos um padrão geral, inclusive com outros minérios.

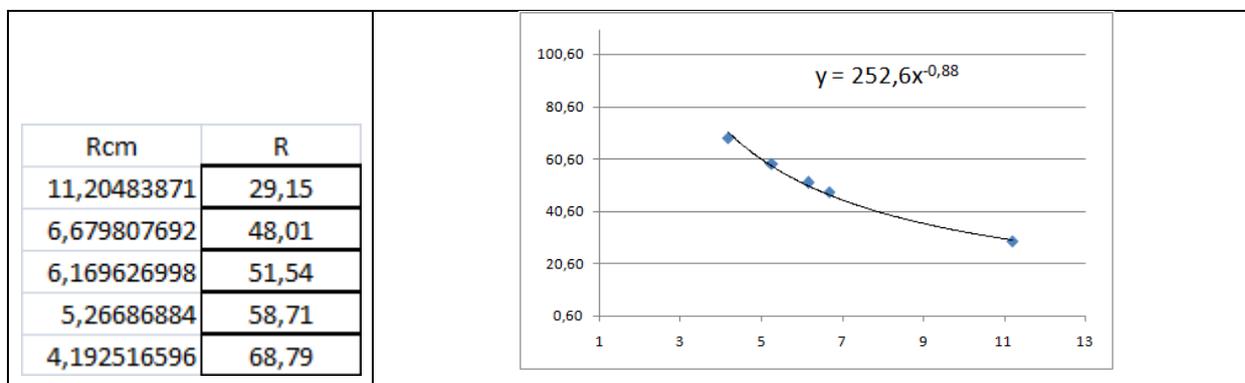
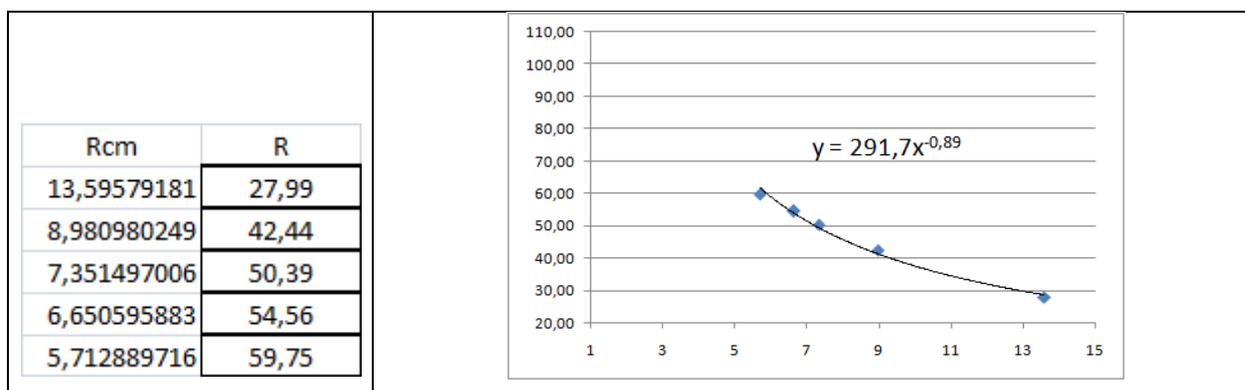
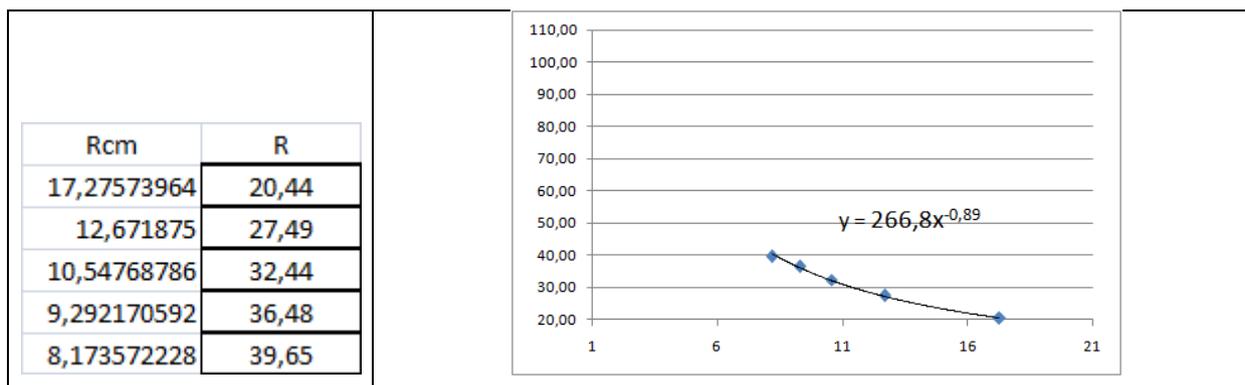
Observamos como fica a curva se introduzimos o ponto (108,44, 1) para ambos os testes:



Assim, junto com observar a variação operacional da flotação mediante a Curva de Seletividade (operação mais rápida ou mais lenta), é possível observar condições que alterem a seletividade geral do processo, para bem ou para mal, como por exemplo: tipos de minério (geometalurgia); grau de moagem/liberação; ambiente químico; etc.

Exemplo 2: Zinco

Testes de Flotação fornecidos por usina de flotação de minério de Zinco em 06 de novembro 2014

Teste 02

Teste 04

Teste 05


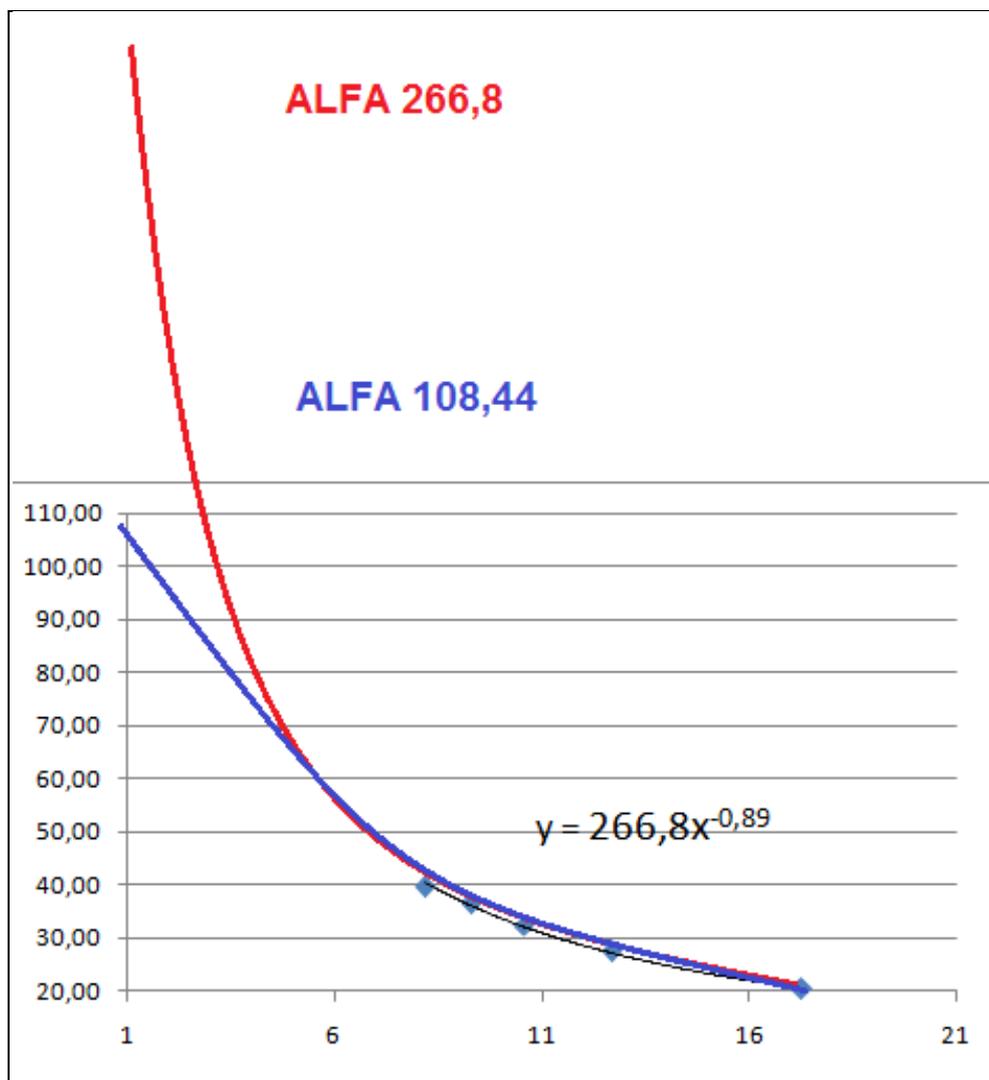
Como observado nas curvas acima, a relação entre massa flotada e recuperação é perfeita. Assim, se for flotada mais ou menos massa se terá mais ou menos recuperação no produto.

Ou seja, fica provada a relação $R = f(Rcm)$, 1ª lei do Modelo Operacional

Já padronizado o valor de ALFA para o modelo, as curvas sempre irão ter origem no ponto $(R, Rcm) = (108,44, 1)$, e o modelo irá calcular usando agora apenas os valores finais do teste (exemplo teste 02):

$$a = 9,83\%Zn; c = 28,35\%Zn; r = 4,03\%Zn$$

Usando ALFA constante a seletividade fica mais prática de utilizar.



Desempenho Mássico e Metalúrgico Para Concentração

MOPE PROCESSOS MINERAIS

Insira os dados e pressione 'Calcular'

Grandezas Metalúrgicas	Grandezas Mássicas	Seletividade
Teor da Alimentação: 9,83	Massa da Alimentação (%): 100,00	Alfa: 108,44
Teor do Concentrado: 28,35	Massa do Concentrado (%): 23,85	Beta: -0,318
Teor do Rejeito: 4,03	Massa do Rejeito (%): 76,15	
Recuperação Met. (%): 68,78	Rcm: 4,19	

Calcular

Obtivemos BETA = -0,318

Já no teste 04 a seletividade foi um pouco menor (BETA = -0,342):

$$a = 10,14\%Zn; c = 34,63\%Zn; r = 4,95\%Zn$$

Desempenho Mássico e Metalúrgico Para Concentração

Insira os dados e pressione 'Calcular'

Grandezas Metalúrgicas		Grandezas Mássicas		Seletividade	
Teor da Alimentação	10,14	Massa da Alimentação (%)	100,00	Alfa	108,44
Teor do Concentrado	34,63	Massa do Concentrado (%)	17,49	Beta	-0,342
Teor do Rejeito	4,95	Massa do Rejeito (%)	82,51		
Recuperação Met. (%)	59,72	Rcm	5,72		

Calcular

E, no teste 05, pior ainda (a seletividade piora quando o valor absoluto de BETA for maior).

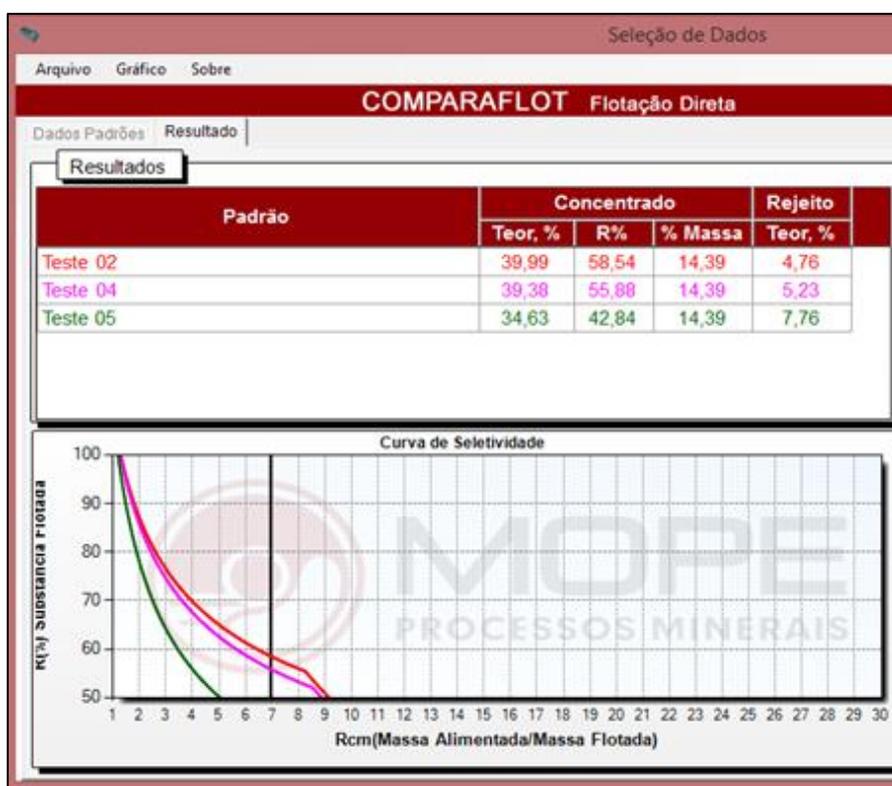
Desempenho Mássico e Metalúrgico Para Concentração

Insira os dados e pressione 'Calcular'

Grandezas Metalúrgicas		Grandezas Mássicas		Seletividade	
Teor da Alimentação	11,63	Massa da Alimentação (%)	100,00	Alfa	108,44
Teor do Concentrado	37,70	Massa do Concentrado (%)	12,22	Beta	-0,479
Teor do Rejeito	8,00	Massa do Rejeito (%)	87,78		
Recuperação Met. (%)	39,62	Rcm	8,18		

Calcular

Utilizado o programa **COMPARAFLOT**, observa-se que, para a mesma massa flotada, os testes 02 e 04 atingiriam qualidade no concentrado com recuperação entre 55 e 58%, com vantagem para a condição 02. Já a condição testada no teste 05, atingiria produto com muito menos recuperação metalúrgica.

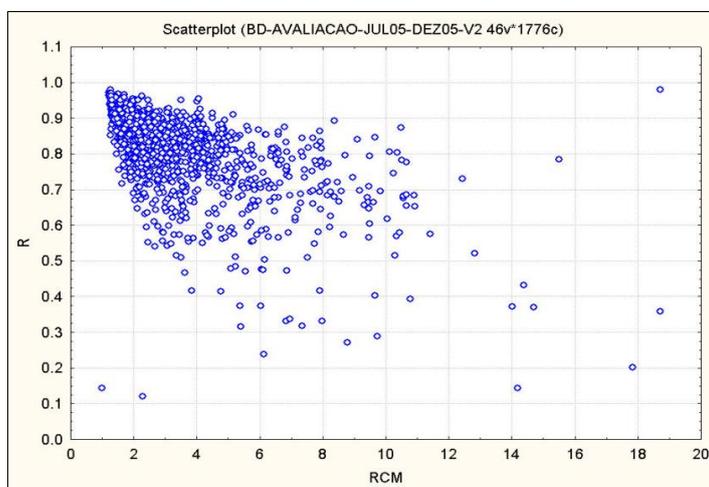


CURVA DE SELETIVIDADE NA USINA (OPERAÇÃO CONTINUA)

Nas usinas industriais raramente a lei de Conservação de massa é cumprida, de modo que os pontos de operação (R, Rcm) ficam muito dispersos, porque os teores às vezes representam momentos de acúmulo ou de desafogo de massa do circuito, saindo estes fora da Curva de Seletividade. Conhecemos plantas que, em determinados instantes, usando os teores de alimentação, concentrado e rejeito geral, apresentam valores negativos de recuperação. Já observamos também instantes com recuperações acima de 100%, por causa da movimentação de cargas circulantes.

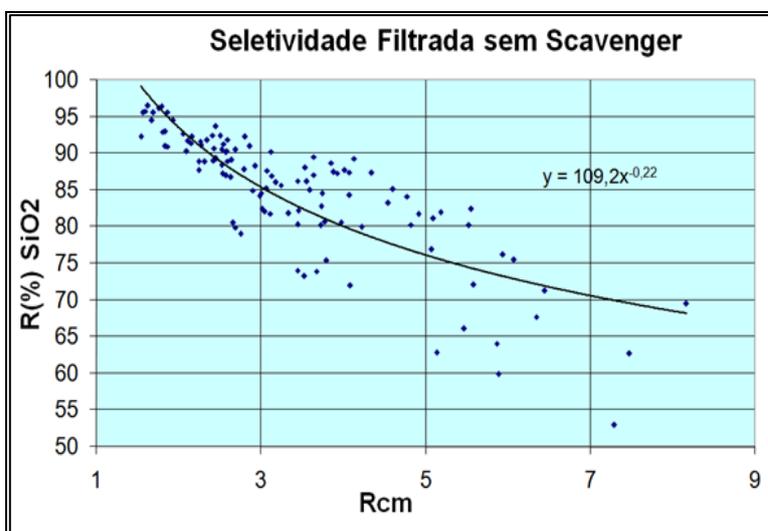
Já os valores médios, de períodos mais longos, representam melhor a curva.

Exemplo 1: Vargem Grande 2005 (flotação de sílica)



Veja acima que os dados são dispersos até demais, embora todo aponta para ALFA (eixo vertical) entre 100 e 110% de recuperação. Ao plotar estes dados pelo MatLab, obtivemos o valor de ALFA 108,44.

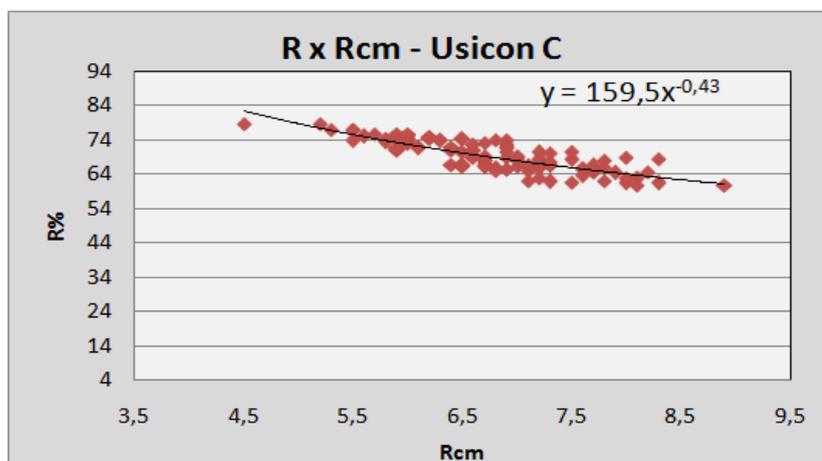
Filtrando alguns dados fora da curva (recuperações negativas ou acima de 100%), também aqueles com alimentação muito fora do comum, e etc., a curva fica da forma ilustrada abaixo (ALFA já está ficando muito próxima de 108,44):



A chave para uma boa operação é operar com o mínimo de oscilações de inventario de massa dentro do circuito, fazendo convergir os pontos para a Curva, e logo operar deslocando mais ou menos massa, segundo a necessidade do set-point do momento.

Obviamente, a curva vá oscilando a cada instante, por causa de alterações no minério que vá entrando, mas, para isso, o sistema já vá verificando a seletividade a cada instante, alterando a curva e tomando ação acima da última curva aceita pelo programa.

Exemplo 2: (circuito Zinco) filtrando alguns pontos



Quem trabalhar com circuito de flotação poderia checar ALFA, pegando muitos dados diários ou por turno (alimentação, concentrado e rejeito), e logo plotar R vs. Rcm de cada ponto. Logo, filtrar um pacote com restrição de teor de alimentação e de P80. O gráfico vai ficar mais estável, da forma acima.

ALFA será um pouco diferente, mas, pela distância com que a usina opera do eixo R (com Rcm acima de 4), não faz muita diferença fixar ALFA no valor padrão do modelo, de 108,44.

Caro leitor,

MOPE já possui sistemas avançados para simulação e controle otimizante para circuitos de flotação. Qualquer dúvida ou interesse no assunto por favor nos consulte.

Belo Horizonte, novembro 2022

Alexis Yovanovic