

Curso de especialização em tratamento de minérios

Cominuição

Desgaste, carga circulante e prática operacional

Poços de Caldas – 10 de Novembro de 2012

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

Moagem – desgaste

- ❑ Bond – ensaio de A_i – gramas perdidas pelo material de ensaio

Tabela 2 - fórmulas para determinação de desgaste em função do índice de abrasão (g/kWh)

Máquina	Peça de desgaste	Fórmula
Moinho de barras (via úmida)	Barras	$q = 155 (A_i - 0,02)^{0,2}$
	Revestimentos	$q = 15,5 (A_i - 0,015)^{0,3}$
Moinho de bolas (via úmida)	Bolas	$q = 15,5 (A_i - 0,015)^{0,22}$
	Revestimentos	$q = 11,6 (A_i - 0,015)^{0,2}$
Moinho de bolas (via seca)	Bolas	$q = 22\sqrt{A_i}$
	Revestimentos	$q = 2,22\sqrt{A_i}$

Notas: 1 - As fórmulas se aplicam para $0,02 < A_i < 0,8$.

2 - Foram consideradas como material das peças de desgaste as seguintes ligas:

- britadores/cones/hydrocones- aço hadfield
- bolas de moinhos - aço liga com dureza 400 HB
- barras - aço SAE 1090
- revestimento - ligas com dureza 300-350 HB

Moagem – desgaste

- ❑ Bond – ensaio de A_i – gramas perdidas pelo material de ensaio

Máquina	Peça de desgaste	Desgaste (g/kWh) – $A_i = 0,6$
Moinho de barras – úmido	Barras	139
	Revestimento	12
Moinho de bolas – úmido	Bolas	13
	Revestimento	10
Moinho de bolas - seco	Bolas	17
	Revestimento	1,7

moinho para ensaio de AI:

- Placa de **aço SAE 4340 (Brinell 500)**;
- 400 g de minério entre $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{2}$ ”;
- 4 períodos de 15 min a rotação definida.



Moagem – desgaste

☐ Defeitos em bolas:

- ☐ Riscamento;
- ☐ Indentação ou mordida – sem retirada de material;
- ☐ Sulcamento: com retirada de metal;
- ☐ Desgaste metal com metal;
- ☐ “Pitting corrosion”;
- ☐ Lascamento – defeitos de fundição;
- ☐ Fratura hemisférica – mau ajustamento das caixas de fundição;



❑ “Pitting corrosion”:

- ❑ Lascamento – defeitos de fundição;



rechupe



lascamento

- ❑ Lascamento – defeitos de fundição;



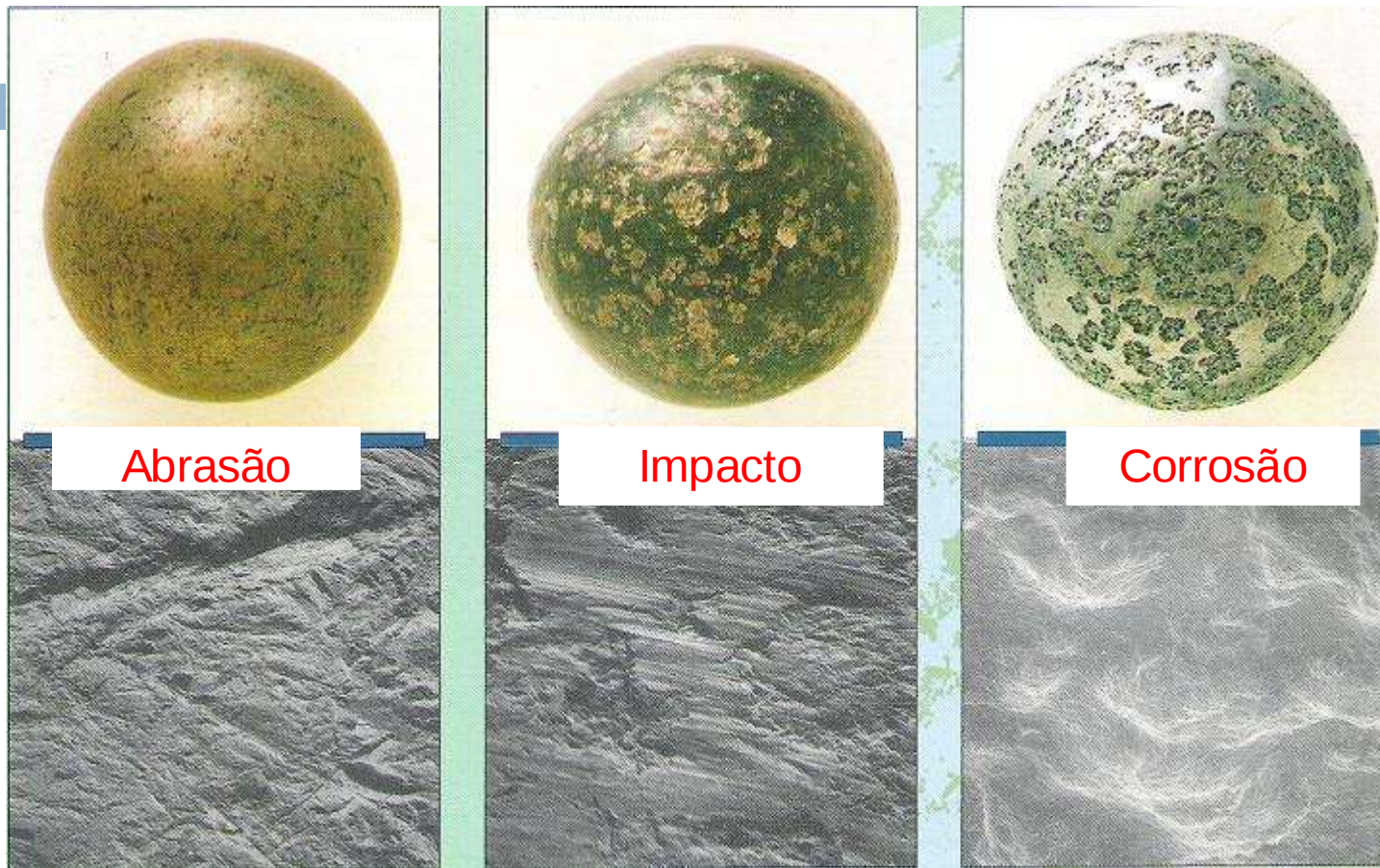
- ❑ Fratura hemisférica – mau ajustamento das caixas de fundição;



- ❑ Fratura hemisférica – mau ajustamento das caixas de fundição;







Abrasão

Causa: caract. física e química do minério e da forma da partícula.

Correção: dureza do corpo moedor

Impacto

Causa: choque com o rev. e com ele próprio.

Correção: ajuste % sól. e/ou trat. térmico da carga e/ou modif. no formato do rev./veloci. rotação.

Corrosão

Causa: caract. da polpa (ácida), temp. da polpa ou tipo de rev.

Correção: utiliz. de carga moedora com alto cromo.

Moagem – desgaste

- ❑ Desgaste:
 - ❑ Desgaste por sulcamento (“gouging abrasion”): Impacto sobre superfícies de baixa dureza sob altas e médias velocidades – arranca pedaços de metal;
 - ❑ Materiais tenazes e duros – materiais temperados (núcleo tenaz e superfície dura).
 - ❑ Erosão: baixas tensões e baixo impacto – movimento das partículas finas sobre as superfícies;
 - ❑ Materiais com alta dureza superficial
 - ❑ Riscamento e moagem: altas tensões e baixo a médio impacto – intermediário dos dois acima.
 - ❑ Materiais com alta resistência ao cisalhamento e compressão

Moagem – desgaste

❑ Desgaste:



Moagem – desgaste

❑ Desgaste:



Moagem – desgaste

❑ Desgaste:



Moagem – desgaste

❑ Desgaste:



Moagem – desgaste

❑ Desgaste:



Moagem – desgaste

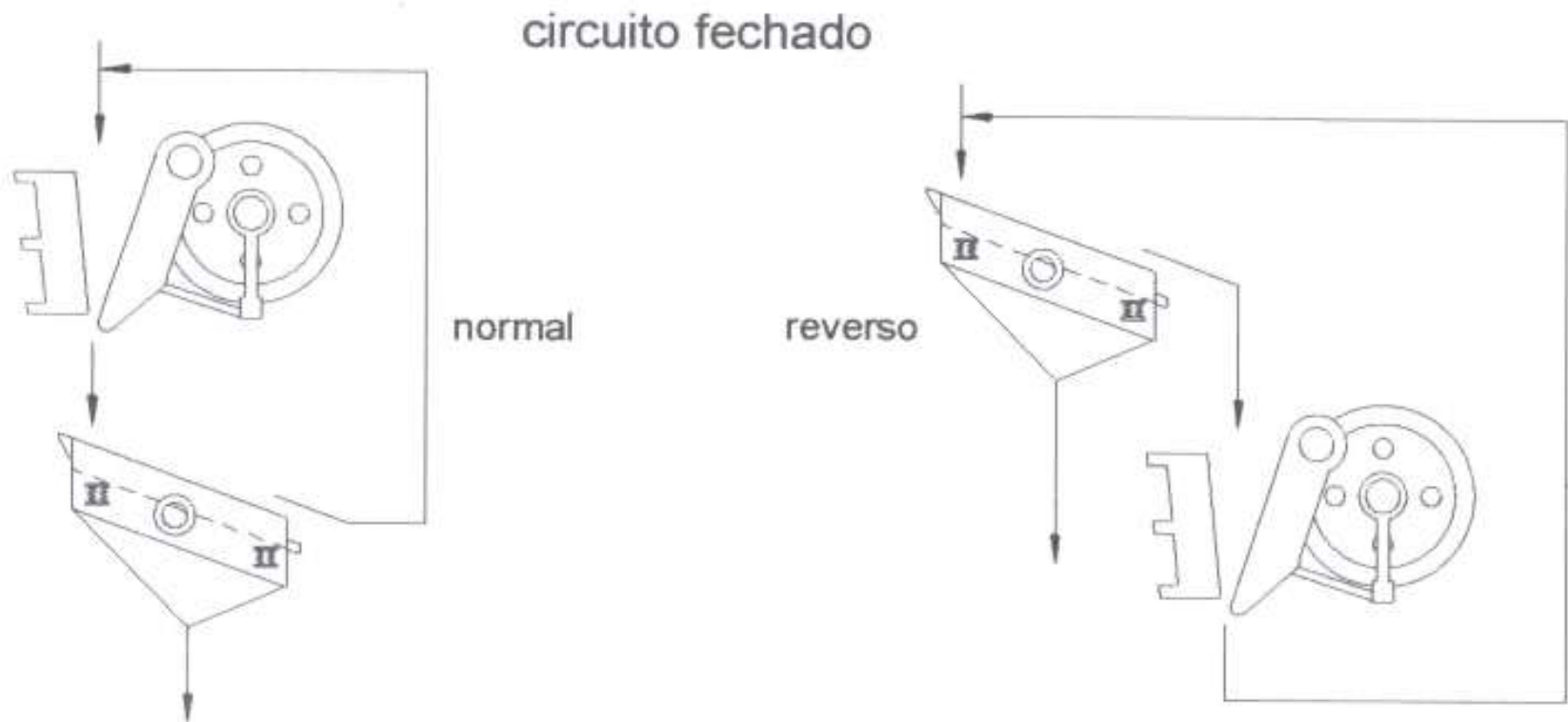
- ❑ Materiais para revestimentos:
 - ❑ Borracha: resiste bem a erosão e riscamento mas se rasga (sulcamento) com facilidade;
 - ❑ Sensibilidade a temperatura;
 - ❑ Sensibilidade a óleos e solventes orgânicos;

Moagem – Carga circulante



- ❑ Ferramenta para se acertar a distribuição granulométrica do produto do moinho, garantindo:
 - ❑ Tamanho máximo do produto;
 - ❑ Minimizar geração de finos / ultrafinos.

Moagem – Carga circulante



Moagem – Carga circulante

- Carga circulante (na britagem):

Circuito fechado normal

$$R_1 = \frac{10^6}{EY} - 100$$

Circuito fechado reverso

$$R_2 = \frac{1}{Y} \left[\frac{10^6}{E} - 100 Z \right]$$

R_1, R_2 = carga circulante em porcentagem da alimentação nova;

E = eficiência de peneiramento (%) = massa passante na peneira/massa passante na alimentação da peneira.

Y = % passante na peneira da descarga do britador.

Z = % de passante na alimentação nova.

Moagem – Carga circulante

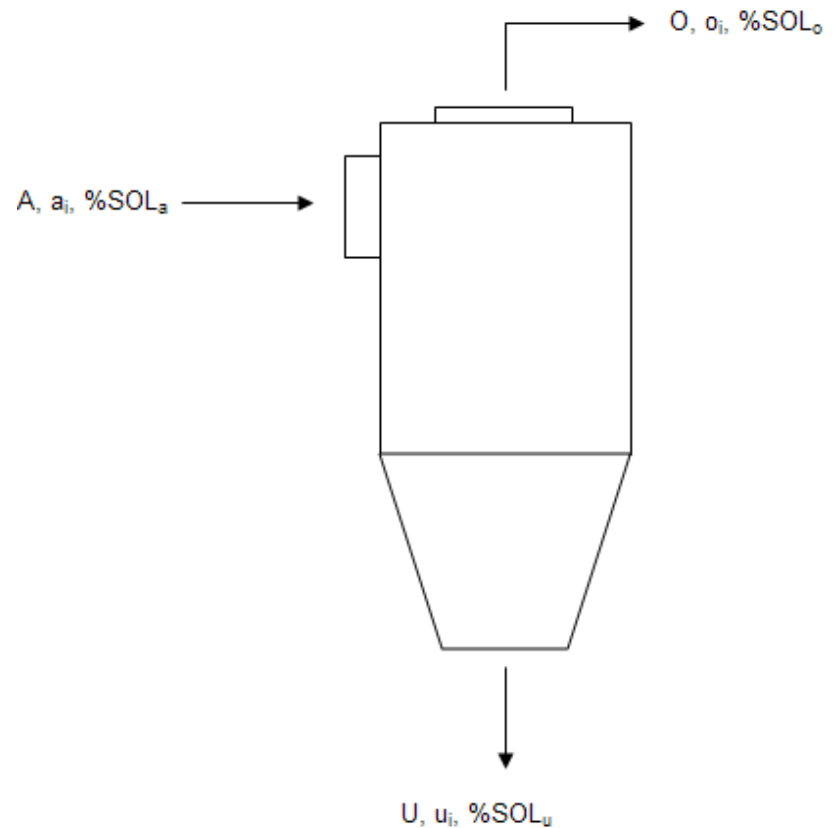
□ Carga circulante (na moagem):

- Allis Chalmers;

- Karra;

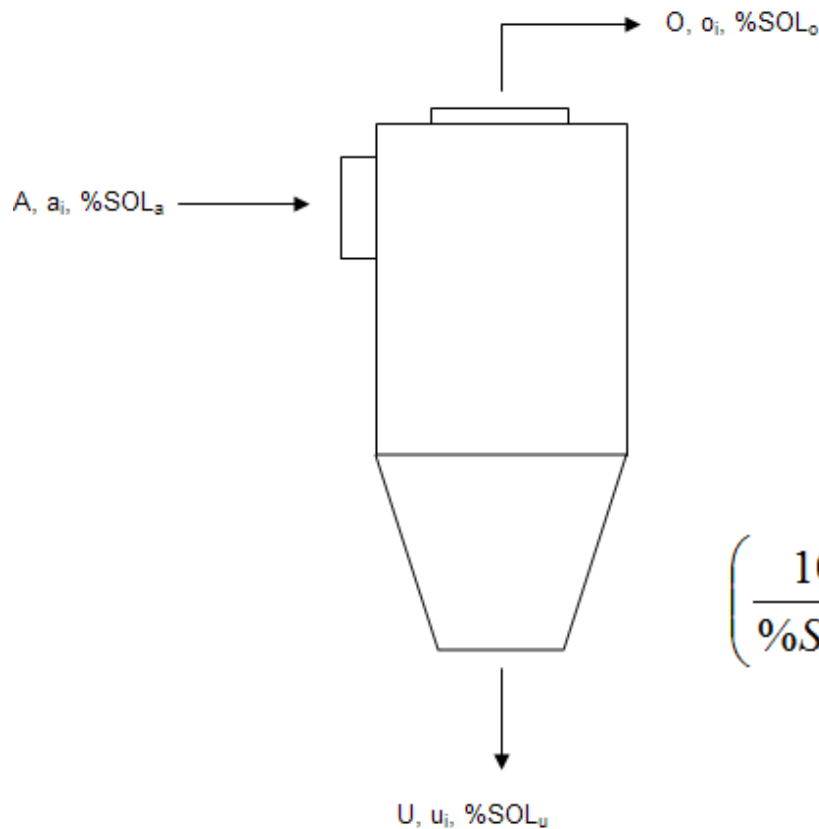
□ Partição do ciclone:

- vazão de sólidos - A , O , U ;
- massa em cada fração granulométrica - a_i , o_i e u_i ;
- porcentagem de sólidos - $\%SOL_a$, $\%SOL_o$ e $\%SOL_u$



Moagem – Carga circulante

- Carga circulante (na moagem):



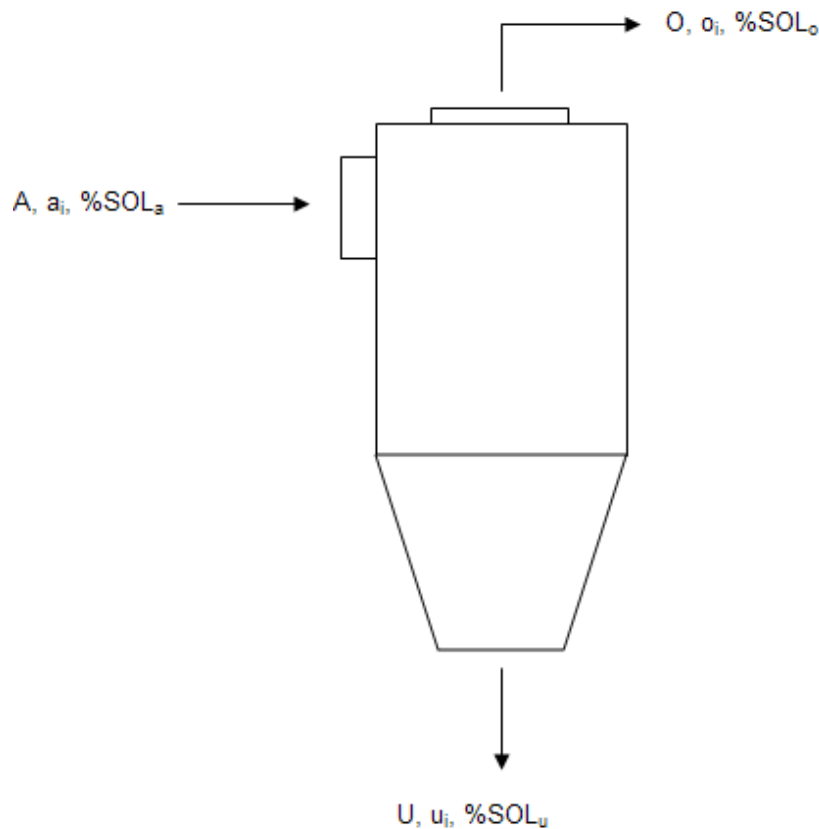
$$A = O + U$$

$$A \cdot a_i = O \cdot o_i + U \cdot u_i$$

$$\left(\frac{100}{\%SOL_a} - 1 \right) \cdot A = \left(\frac{100}{\%SOL_o} - 1 \right) \cdot O + \left(\frac{100}{\%SOL_u} - 1 \right) \cdot U$$

Moagem – Carga circulante

- Carga circulante (na moagem):



$$\frac{U}{A} = \frac{a_i - o_i}{u_i - o_i}$$

$$\frac{U}{A} = \frac{\frac{1}{\%SOL_a} - \frac{1}{\%SOL_o}}{\frac{1}{\%SOL_u} - \frac{1}{\%SOL_o}}$$

Moagem – Carga circulante

□ Carga circulante (na moagem):

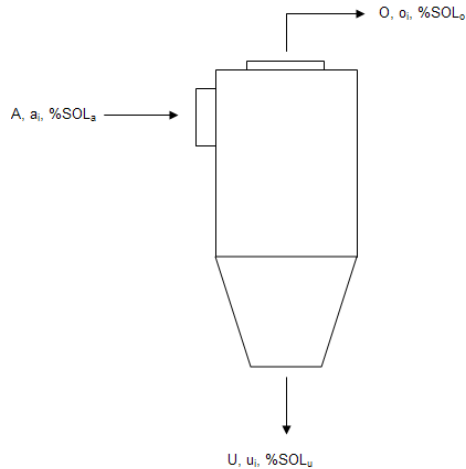


Tabela 3.3 - Balanço de massa em um ciclone

Tamanho (μm)	a_i	o_i	u_i	Partição para <i>underflow</i>
212	10,1	1,8	21,7	0,42
150	12,4	4,5	19,1	0,54
106	15,5	11	16,8	0,78
75	16,2	11,2	11,9	7,14
53	7,8	3,9	4,8	4,33
38	4,9	7,9	3,7	0,71
-38	33,1	59,9	21,9	0,70
Sólidos (%)	49	44	67	0,30

Moagem – Carga circulante

□ Exercício:

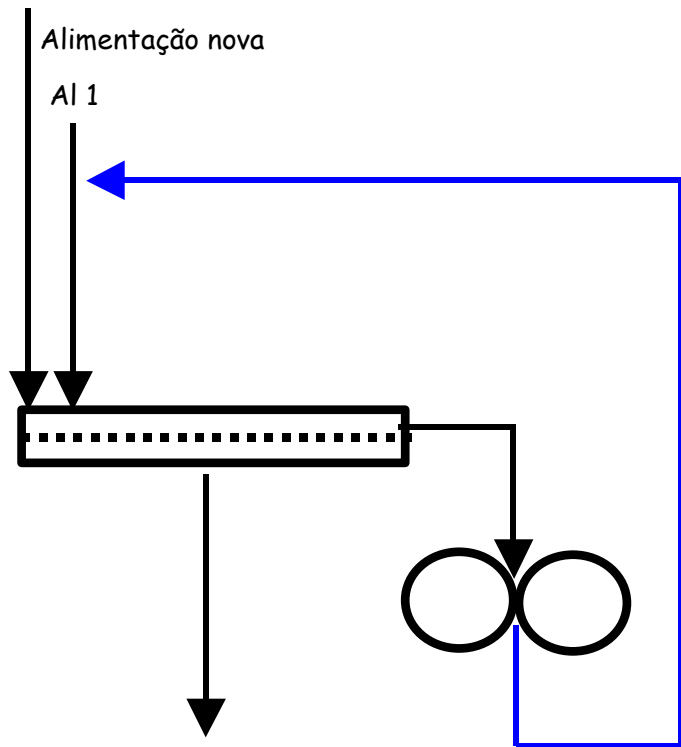
22) Calcular a carga circulante de um circuito fechado de moagem em que as porcentagens de sólidos são as seguintes:

Overflow: 20%

Underflow: 70%

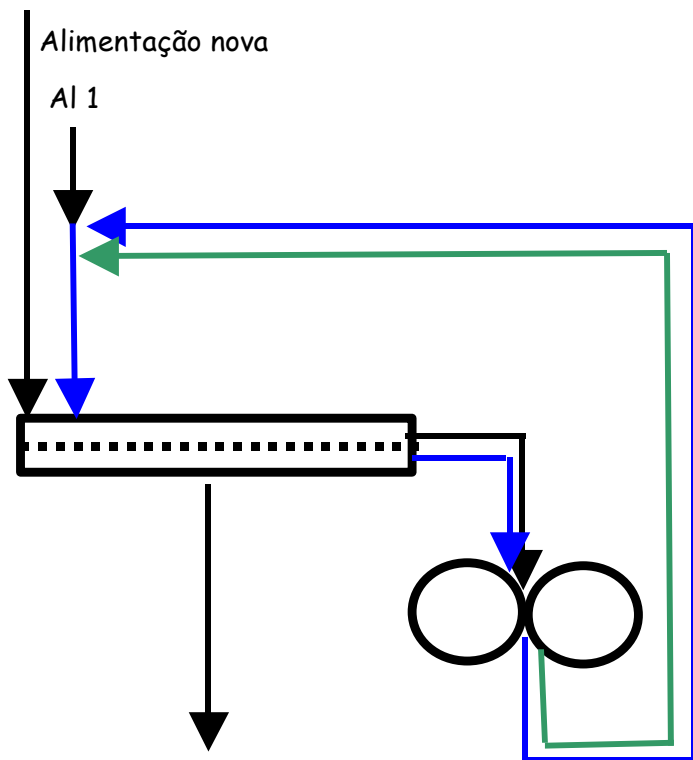
Alimentação: 45%

carga circulante



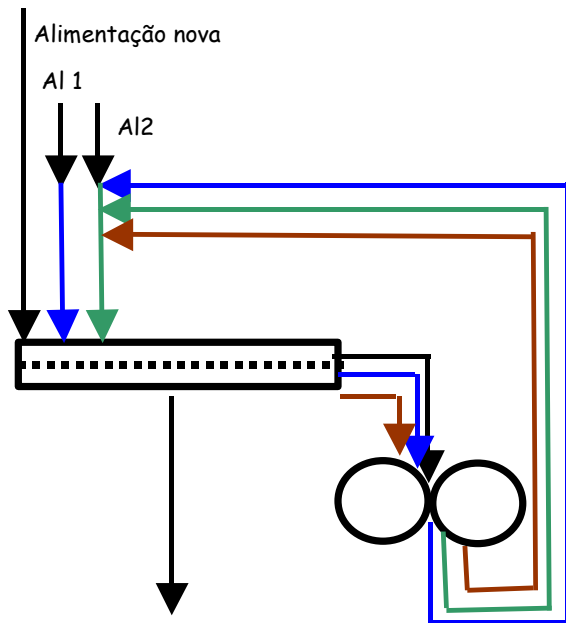
	alim.nova		over	under	pr.br.rl.	al.1
tela	t/h	imperf	t/h	t/h	t/h	t/h
3"	2,5	100	2,5	0,0		2,5
2"	12,2	100	12,2	0,0	6,3	18,5
1"	30,0	100	30,0	0,0	10,4	40,5
1/2"	24,0	18	4,3	19,7	9,4	33,4
1/4"	13,7	0	0,0	13,7	4,7	18,4
8#	8,5	0	0,0	8,5	3,7	12,1
14#	5,1	0	0,0	5,1	5,2	10,4
150#	2,9	0	0,0	2,9	1,0	3,9
-150#	21,1	15	3,2	18,0	11,5	32,6
	120,0		52,2	67,8	<u>52,3</u>	172,3

carga circulante



	pr.br.rl.	al.1		over	under	pr.br.rl.	al.2
tela	t/h	t/h	imperf	t/h	t/h	t/h	t/h
3"		2,5	100	2,5	0,0		2,5
2"	6,3	18,5	100	18,5	0,0	8,7	20,9
1"	10,4	40,5	100	40,5	0,0	14,5	44,5
1/2"	9,4	33,4	18	6,0	27,4	13,0	37,0
1/4"	4,7	18,4	0	0,0	18,4	6,5	20,2
8#	3,7	12,1	0	0,0	12,1	5,1	13,5
14#	5,2	10,4	0	0,0	10,4	7,2	12,4
150#	1,0	3,9	0	0,0	3,9	1,4	4,3
-150#	11,5	32,6	15	4,9	27,7	15,9	37,1
	52,3	172,3		72,4	99,9	72,4	192,4

carga circulante



tela	al.2					al.3					al.4	
	t/h	imperf	t/h	t/h	pr.br.rl.	t/h	imperf	t/h	t/h	pr.br.rl.	t/h	t/h
3"	2,5	100	2,5	0,0		2,5	100	2,5	0,0		2,5	
2"	20,9	100	20,9	0,0	9,6	21,8	100	21,8	0,0	9,9	22,1	
1"	44,5	100	44,5	0,0	16,0	46,0	100	46,0	0,0	16,5	46,5	
1/2"	37,0	17	6,3	30,7	14,4	38,3	17	6,5	31,8	14,9	38,8	
1/4"	20,2	0	0,0	20,2	7,2	20,9	0	0,0	20,9	7,4	21,1	
8#	13,5	0	0,0	13,5	5,6	14,0	0	0,0	14,0	5,8	14,2	
14#	12,4	0	0,0	12,4	8,0	13,1	0	0,0	13,1	8,3	13,4	
150#	4,3	0	0,0	4,3	1,6	4,5	0	0,0	4,5	1,7	4,5	
-150#	37,1	15	5,6	31,5	17,5	38,7	15	5,8	32,9	18,2	39,3	
	192,4		79,8	112,6	79,8	199,8		82,6	117,2	82,6	202,6	

carga circulante

	al.4					al.5					al.6					al.7
tela	t/h	imperf	over t/h	under t/h	pr.br.rl. t/h	t/h	imperf	over t/h	under t/h	pr.br.rl. t/h	t/h	imperf	over t/h	under t/h	pr.br.rl. t/h	t/h
3"	2,5	100	2,5	0,0		2,5	100	2,5	0,0		2,5	100	2,5	0,0		2,5
2"	22,1	100	22,1	0,0	10,0	22,2	100	22,2	0,0	10,1	22,3	100	22,3	0,0	10,1	22,3
1"	46,5	100	46,5	0,0	16,7	46,8	100	46,8	0,0	16,8	46,8	100	46,8	0,0	16,9	46,9
1/2"	38,8	17	6,6	32,2	15,1	39,0	17	6,6	32,4	15,1	39,1	17	6,6	32,5	15,2	39,1
1/4"	21,1	0	0,0	21,1	7,5	21,2	0	0,0	21,2	7,6	21,3	0	0,0	21,3	7,6	21,3
8#	14,2	0	0,0	14,2	5,9	14,3	0	0,0	14,3	5,9	14,3	0	0,0	14,3	5,9	14,4
14#	13,4	0	0,0	13,4	8,4	13,5	0	0,0	13,5	8,4	13,5	0	0,0	13,5	8,4	13,5
150#	4,5	0	0,0	4,5	1,7	4,6	0	0,0	4,6	1,7	4,6	0	0,0	4,6	1,7	4,6
-150#	39,3	15	5,9	33,4	18,4	39,5	15	5,9	33,6	18,5	39,6	15	5,9	33,7	18,5	39,7
	202,6		83,7	118,9	<u>83,7</u>	203,7		84,1	119,6	<u>84,1</u>	204,1		84,3	119,8	<u>84,2</u>	204,2

carga circulante

	al.7					al.8					
	over	under	pr.br.rl.			over	under	pr.br.rl.			
tela	t/h	imperf	t/h	t/h	t/h	t/h	imperf	t/h	t/h	t/h	t/h
3"	2,5	100	2,5	0,0		2,5	100	2,5	0,0		2,5
2"	22,3	100	22,3	0,0	10,1	22,3	100	22,3	0,0	10,1	22,3
1"	46,9	100	46,9	0,0	16,9	46,9	100	46,9	0,0	16,9	46,9
1/2"	39,1	17	6,7	32,5	15,2	39,1	17	6,7	32,5	15,2	39,2
1/4"	21,3	0	0,0	21,3	7,6	21,3	0	0,0	21,3	7,6	21,3
8#	14,4	0	0,0	14,4	5,9	14,4	0	0,0	14,4	5,9	14,4
14#	13,5	0	0,0	13,5	8,4	13,5	0	0,0	13,5	8,4	13,5
150#	4,6	0	0,0	4,6	1,7	4,6	0	0,0	4,6	1,7	4,6
-150#	39,7	15	5,9	33,7	18,6	39,7	15	6,0	33,7	18,6	39,7
	204,2		84,3	119,9	<u>84,3</u>	204,3		84,3	119,9	<u>84,3</u>	204,3

Variáveis

Variáveis que afetam a operação de um moinho

– Variáveis de projeto

- ✓ Tipo de revestimento.
- ✓ Rotação do moinho (% da velocidade crítica, oscila de 69 a 75%).
- ✓ Tamanho de reposição do corpo moedor. Normalmente a reposição é realizada com o maior tamanho ou com os dois maiores tamanhos para garantir um perfeito colar de distribuição.
- ✓ Relação entre o diâmetro e o comprimento;
- ✓ Tipo de descarga (overflow / grelha);

Variáveis

Variáveis de Controle Operacional

- ✓ Taxa de alimentação
- ✓ Granulometria da alimentação
- ✓ Granulometria do produto moído
- ✓ % de carga circulante (cc):
 - ✓ Redução do tamanho médio de alimentação do moinho;
 - ✓ Aumento da circulação de material próximo ao tamanho final de moagem;
 - ✓ Diminuição do tempo de residência e geração de finos;
 - ✓ Menor necessidade de tamanhos grandes de bolas;
 - ✓ Melhor preenchimento da carga;
 - ✓ Melhor ajuste da relação sólidos/líquido.
- ✓ Grau de enchimento do moinho / potência
- ✓ Porcentagem de sólidos (evitar muito baixo ou muito alta);
- ✓ Quantidade de finos (evitar muito baixo ou muito alta);

Variáveis

VARIÁVEIS DE CONTROLE	FINURA DO PRODUTO	VARIÁVEIS CONTROLADAS			PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NO MOINHO
		CARGA CIRCULANTE	NÍVEL DA CAIXA DE BOMBA		
Vazão de alimentação	- lento	+ lento	+ lento		+ lento
Água na caixa	+ rápido	+ rápido	+ rápido		+ lento
Velocidade da bomba	+ - rápido	+ rápido	- rápido		+ rápido
Água no moinho	+ - lento	+ lento	+ lento		- rápido
Velocidade do moinho	+ - rápido	- + rápido	- lento		- lento

Moagem – Carga circulante

- ❑ Maior carga circulante:
 - ❑ Menor tempo de residência;
 - ❑ Amortecimento da carga – cushioning effect;
 - ❑ Importante a presença de um pouco de lamas.
 - ❑ Menor geração de finos.

Moagem – Carga circulante

- ❑ Impacto sobre a alimentação nova

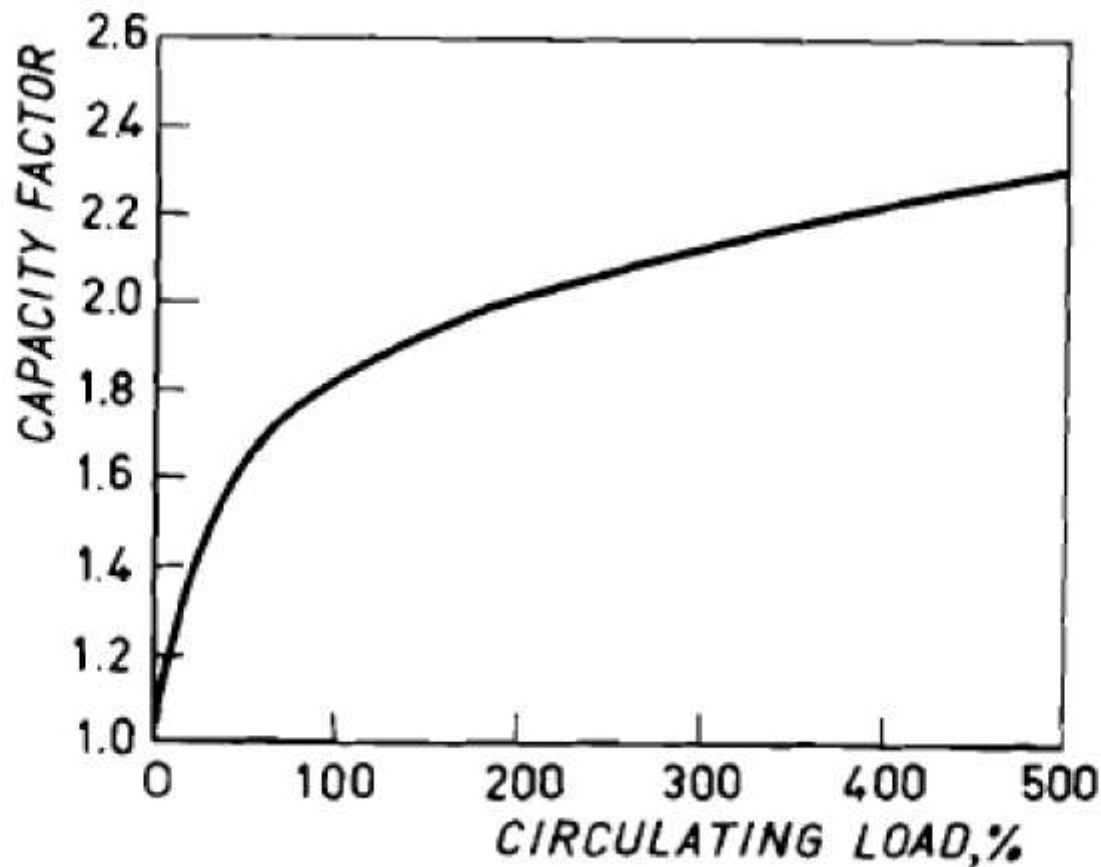


Figure 1. Effect of circulating load on mill capacity – After Edward W. Davis, 192
Fonte: Jankovic, 2012

Moagem – Carga circulante

❑ Impacto sobre a alimentação nova

Table 1. Effect of circulating load – After Guest (1972)

Circulating load	Relative amounts of -48mesh material produced per unit time	Relative amounts of -200mesh material produced per unit time
40	100	100
111	122	102
240	133	98

Moagem – Carga circulante

❑ Impacto sobre a alimentação nova

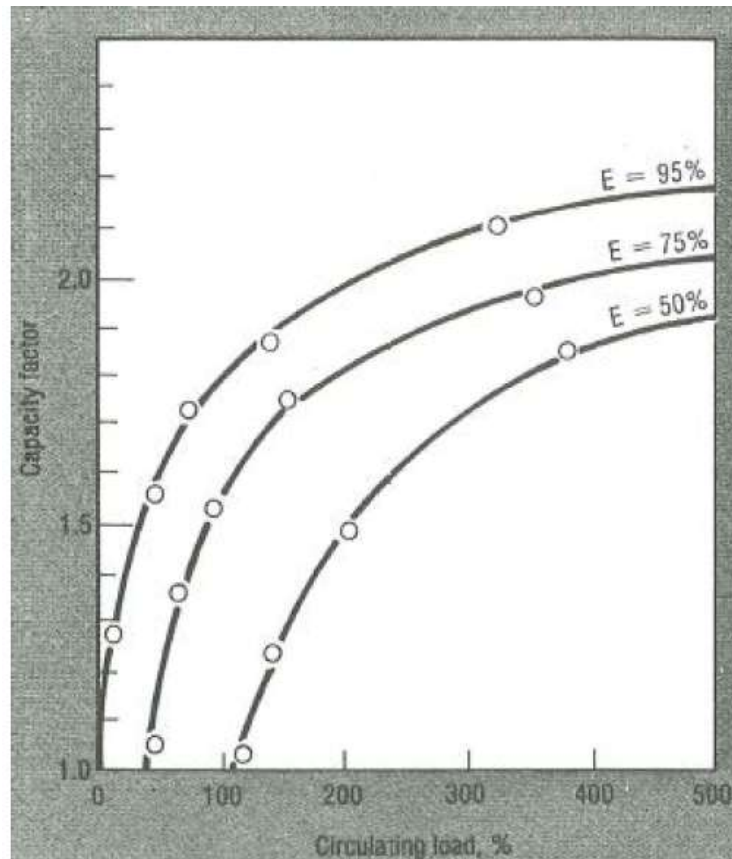
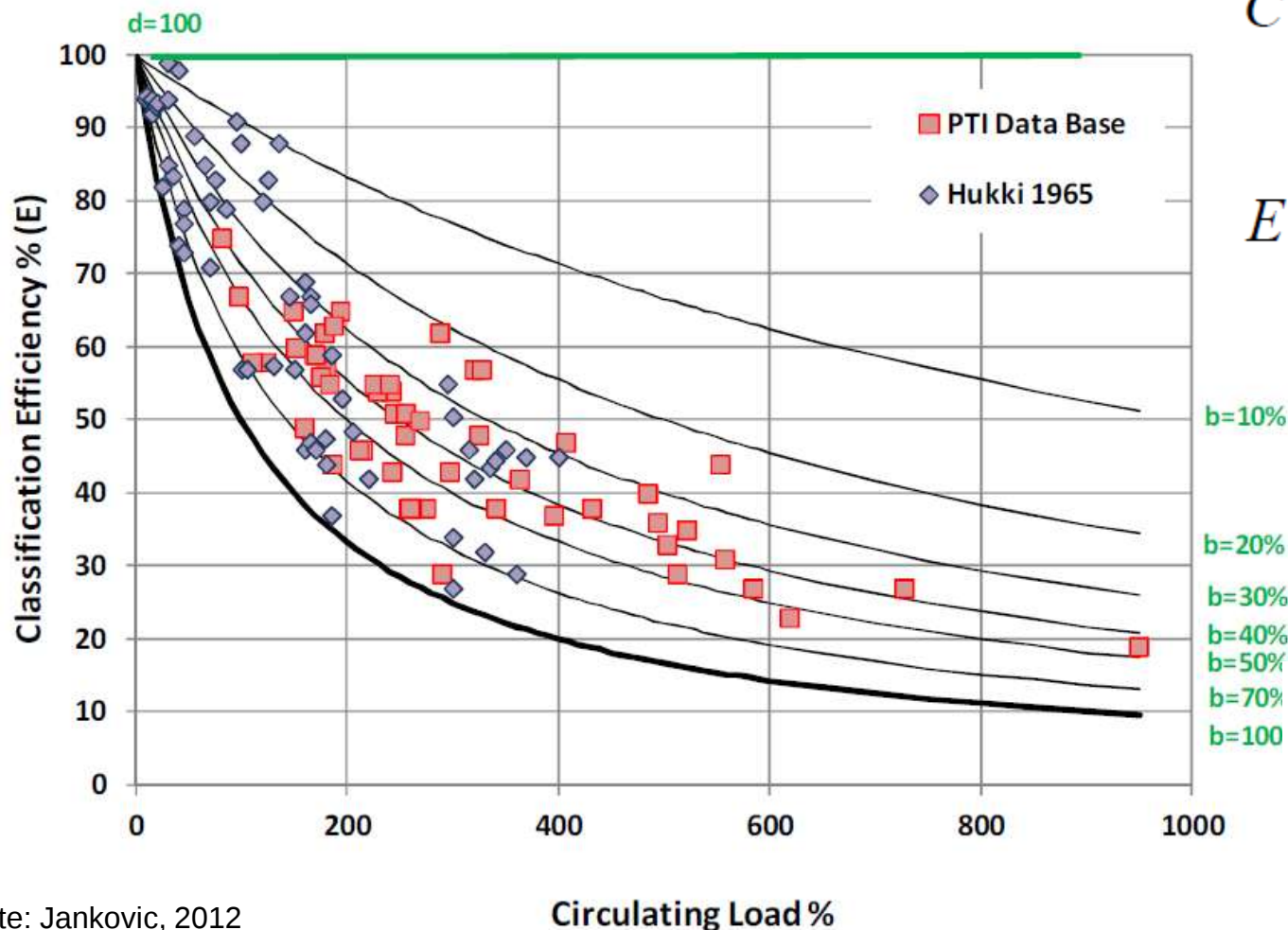


Figure 2. Effect of circulating load and classification efficiency on milling circuit capacity – After Hukki (1979)

Moagem – Carga circulante

❑ Impacto sobre a alimentação nova

❑ Alimentação (c), OF (d), UF (b)



$$C = \frac{d - c}{c - b} 100\%$$

$$E = \frac{d(c - b)}{c(d - b)} 100\%$$

$$E = \frac{d}{d + b \frac{C}{100}} 100$$

Moagem – Carga circulante

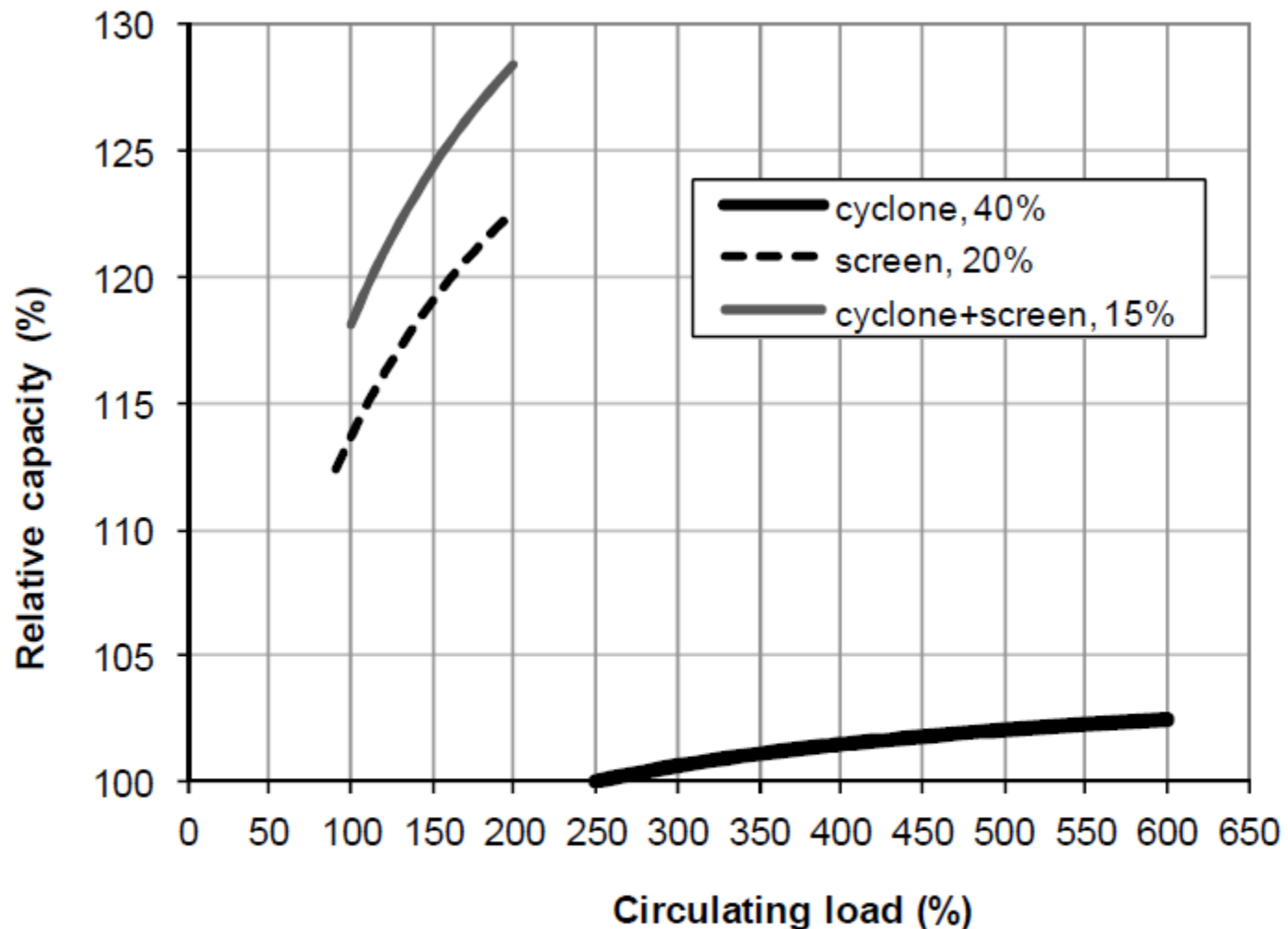


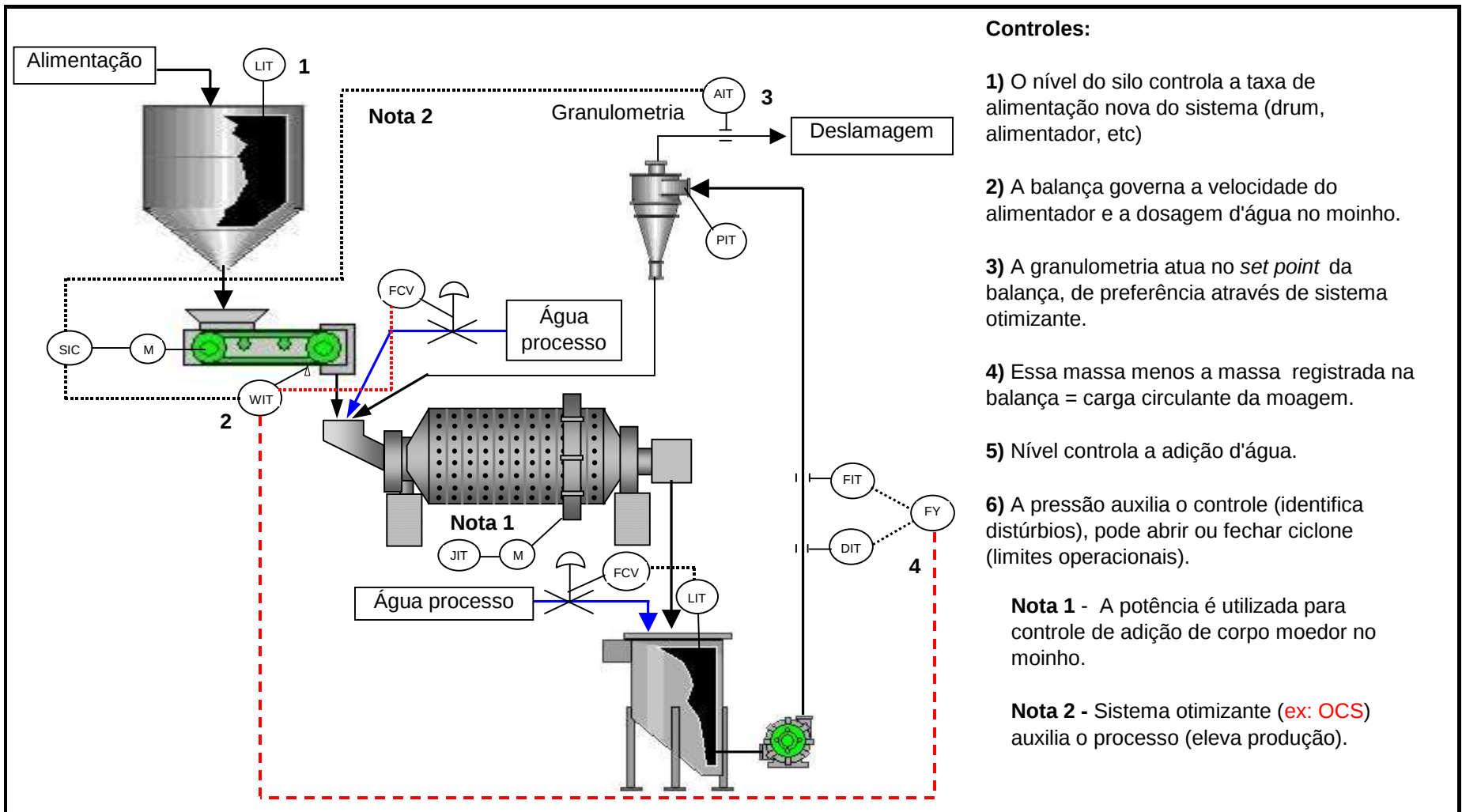
Figure 7. Circuit relative capacity compared to conventional circulating load of 250% and classification efficiency of 50%

Moagem – Prática operacional

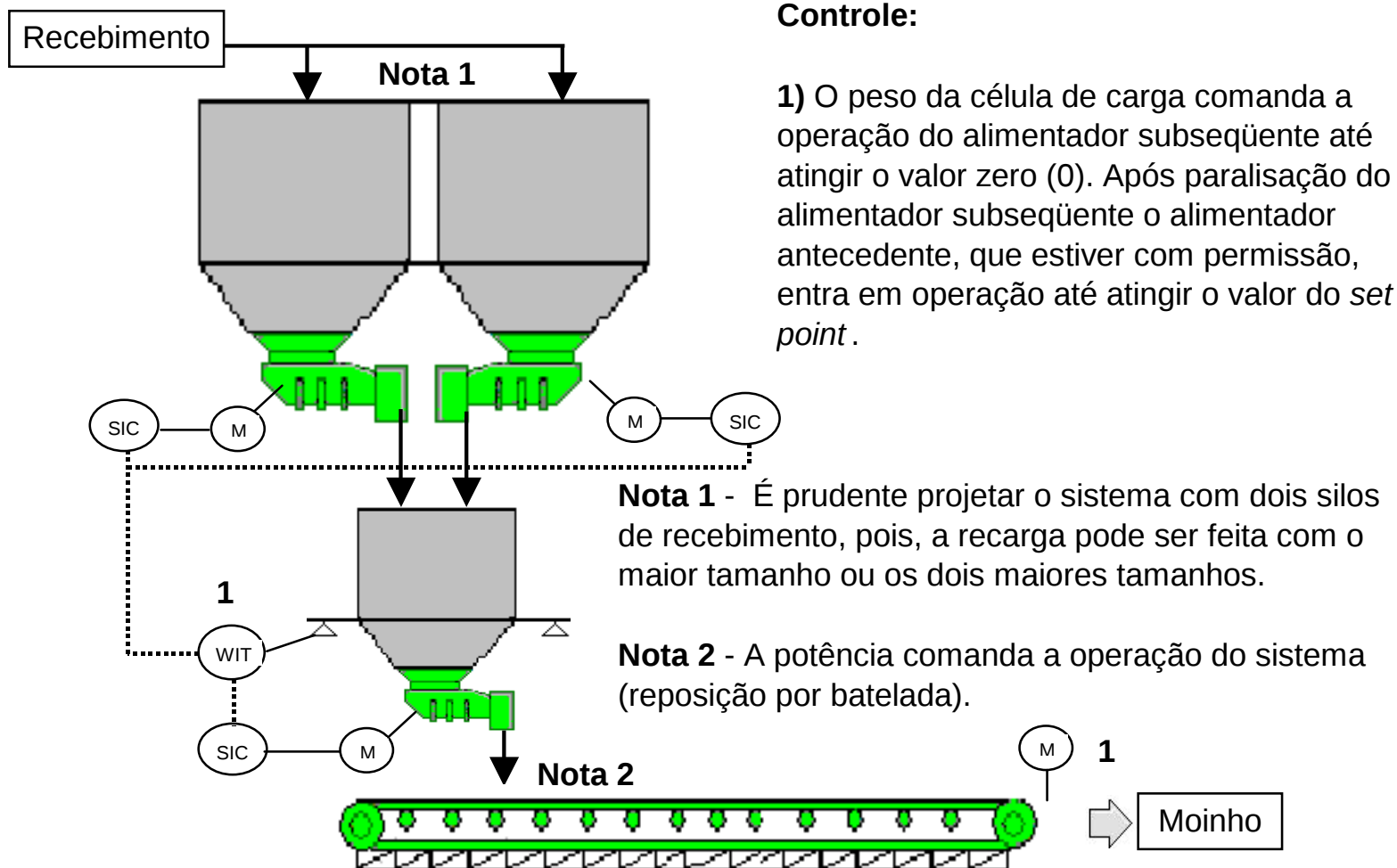
- Operador:
 - ▣ Mecânica;
 - ▣ Vazão;
 - ▣ Amperagem / potência;
 - ▣ Ruído;
 - ▣ Temperatura;
 - ▣ Porcentagem de sólidos;
 - ▣ Granulometria – P80, P95;
 - ▣ CC;
 - ▣ Condições químicas – corrosão.

- Sistemas de controle;

Controle



Controle



FONTES:

- Mineral Processing Technology – Barry Wills e Tim Nappier-Munn. 2006.
- Chaves, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. Vol. 3. 2006.
- Manual de britagem Metso.
- NAPIER-MUNN, T.J. et al. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1999 413 p. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)
- Gupta, A.; Yan, D.; **Mineral processing design and operation: an introduction**. Elsevier, 2006. 693 p. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780444516367>>
- JANKOVIC, A.; VALERY, W. Closed circuit ball mill – basics revisited. In: **COMMINUTION' 12**, 2012, Cape Town. Proceedings: Falmouth. MEI, 2012.
- Imagens e vídeos google images
- Imagens do autor