

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE CICLONES COM BASE EM SIMULAÇÕES PRÉVIAS E ENSAIOS EM ESCALA INDUSTRIAL

Flávio Augusto Pesce Storolli¹, Homero Delboni Jr.²

1 – Engenheiro de Minas, M.Eng., Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2373. Cidade Universitária. CEP 05508-900. São Paulo/SP.
E-mail: flavio.storolli@poli.usp.br

2 – Engenheiro de Minas, M.Eng., Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP. Av. Prof. Mello Moraes, 2373. Cidade Universitária. CEP 05508-900. São Paulo/SP.
E-mail: hdelboni@usp.br

RESUMO

O ciclone é um dos principais equipamentos utilizados em processos de classificação de partículas sólidas em usinas de Tratamentos de Minérios. Apesar da grande evolução da tecnologia digital, que desenvolveu poderosas ferramentas para a análise de processos, os ensaios de campo permanecem como um importante procedimento, utilizado para o dimensionamento e a verificação do desempenho da operação de ciclonagem. Este trabalho mostra um exemplo de ensaios de campo, efetuados em escala industrial, descrevendo os procedimentos adotados para sua realização e comparando os resultados preliminares, simulados em um programa adotado por um tradicional fabricante de ciclones, com os resultados experimentais, analisados em um programa comercial de modelagem de operações industriais. Nesta comparação são abordados alguns dos mais importantes parâmetros para a determinação do desempenho do ciclone. Também são comparados os resultados experimentais com os valores calculados pelo método de dimensionamento proposto por Arterburn.

PALAVRAS-CHAVE: classificação; simulação; ciclone.

1. INTRODUÇÃO

Um dos procedimentos ainda hoje mais adotados para dimensionamento e operação de ciclones consiste na realização de ensaios em escala industrial. Muitos destes ensaios chegam a ser decisivos na opção por um equipamento, e, em alguns casos, são determinantes na decisão de sequência de projetos. Neste artigo são apresentados os resultados obtidos para uma campanha de ensaios realizada sobre um minério de ferro. Os resultados experimentais foram parametrizados e analisados no programa "JKSimMet" e comparados aos simulados previamente, no "Programa de Análise de Problemas de Ciclones" (PAPCKEB), utilizado pela Krebs Engineers. O método adotado para a comparação, incluiu as etapas de dimensionamento e simulação de desempenho, ensaios em escala industrial e análise dos resultados.

Nesta análise, foram comparados parâmetros relativos ao desempenho dos ciclones, como as partições de sólidos e de água, o diâmetro mediano de partição (d_{50}), os diâmetros pelos quais passam 80 e 95% das partículas do "overflow" (d_{80} e d_{95}) e o α , associado à inclinação da curva de partição, avaliando-se a adequação da estimação destes nas simulações, anteriores aos ensaios. Também foram comparados os valores obtidos experimentalmente para os diâmetros d_{50} , d_{80} e d_{95} e os calculados a partir das relações propostas por Richard Arterburn, adotadas por inúmeros profissionais ligados às áreas de projeto e de operações de circuitos de ciclonagem, principalmente, em projetos preliminares.

2. MÉTODO DE ENSAIO

Todos os ensaios foram realizados com os equipamentos já em operação na usina, os ciclones padrões, e outros especialmente instalados, os alternativos. Os principais parâmetros investigados durante as campanhas foram a pressão, peso específico e a concentração de sólidos e a distribuição granulométrica, na alimentação e nos produtos.

O método adotado para a análise dos resultados foi dividido em três etapas, quais sejam, dimensionamento e simulação de desempenho, ensaios em escala industrial e análise dos resultados.

2.1. Dimensionamento e Simulação de Desempenho

Nesta etapa, foram realizados o dimensionamento dos ciclones alternativos e as simulações prévias do desempenho destes e dos ciclones padrões. Para os dimensionamentos e as simulações prévias foi empregado o “Programa de Análise de Problemas de Ciclones” (PAPCKEB), utilizado pela Krebs Engineers Ltd. A simulação no PAPCKEB tem a intenção de prever o desempenho de um determinado ciclone selecionado, face às condições operacionais adotadas, sendo necessária a estimativa prévia de alguns dados da operação, como:

- Densidade dos sólidos (ρ_s) e do líquido (ρ_l);
- Concentração de sólidos na alimentação, em peso (C_w);
- C_w requerido no “underflow”;
- Vazão de polpa (Q_p) ou massa de sólidos na alimentação (m_s);
- Granulometria retida simples, por faixas granulométricas;
- Parâmetro α , associado à inclinação da curva de partição.

2.2. Ensaios em Escala Industrial

Todos os ensaios utilizaram o mesmo procedimento, com período total de amostragem de uma hora, sendo obtidas amostras incrementais, em intervalos de 10 minutos, totalizando 7 alíquotas para cada produto. Como regra geral, buscou-se obter simultaneamente os produtos dos “overflows” e em seguida dos “underflows”, a fim de minimizar possíveis oscilações instantâneas nas condições operacionais dos ciclones.

2.3. Análise dos Resultados

Os resultados de todos os ensaios em escala industrial foram parametrizados e analisados no programa JKSimMet, para a obtenção dos balanços de massas e para o cálculo do diâmetro mediano de partição ($d_{50\text{cor}}$) e do parâmetro α , relativo à inclinação das curvas de partição das operações de ciclonagem estudadas. Estruturalmente, este programa é dividido em dois módulos específicos:

- *Balanco de massas*, onde são calculadas as partições de sólidos e de água, e;
- *Ajuste de modelos*, onde são obtidos os valores relativos aos parâmetros de desempenho da operação, como o diâmetro mediano de partição ($d_{50\text{cor}}$) e o α , associado à inclinação da curva de partição.

O cálculo dos parâmetros do *módulo ajuste de modelos* foi de fundamental importância para a determinação da curva de partição.

3. PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental foi realizada com ensaios em escala industrial em uma usina de concentração de minério de ferro que constou de obtenção de alíquotas referentes à alimentação e aos produtos dos ciclones padrões e dos alternativos. Os ciclones estavam instalados na unidade operacional de moagem e classificação do circuito industrial da empresa, que opera em configuração fechada.

Os ensaios foram realizados com dois modelos de ciclones, sendo o primeiro padrão da usina e o segundo instalado especificamente para a realização dos ensaios:

- 5 unidades da bateria (ciclones Krebs, modelo D26B-1086, de 26 polegadas de diâmetro), foram mantidas com a mesma configuração da operação padrão da usina;
- Em uma posição, foi instalado um ciclone alternativo (Krebs, modelo DS26B-gMAX, de 26 polegadas de diâmetro), com a possibilidade de alteração dos diâmetros do “vortex finder” e do “apex” e dos ângulos das seções cônicas.

Cada ensaio constou de amostragem simultânea das alíquotas dos “overflows” dos dois ciclones selecionados, sendo, na sequência, obtidas as amostras referentes aos dois “underflows”. No total, foram realizados ensaios com 6 condições de montagem diferentes para o ciclone alternativo, sendo três com cada diâmetro de “vortex finder”, de 10 e 12 polegadas, e diferentes combinações de ângulos de seções cônicas.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Simulações Prévias

A Tabela I, representada a seguir, apresenta os resultados das simulações prévias, tanto para o ciclone padrão quanto para as diferentes configurações de montagem utilizadas para o ciclone alternativo.

Tabela I – Resultados das simulações prévias com minério de ferro.

Ensaio n.º	Ciclone	Concentrações de sólidos (%)			Pressão (psi)	Parâmetro α	d_{50cor} (μm)
		Alim.	OF	UF			
1	Padrão	63	47	80	12	3,0	123
	Alternativo	63	43	80	12	3,0	92
2	Padrão	63	47	80	12	3,0	123
	Alternativo	63	45	80	10	3,0	108
3	Padrão	63	47	80	12	3,0	123
	Alternativo	63	45	80	10	3,0	108
4	Padrão	63	47	80	12	3,0	123
	Alternativo	63	43	80	12	3,0	92
5	Padrão	63	47	80	12	3,0	123
	Alternativo	63	43	80	12	3,0	92
6	Padrão	63	47	80	12	3,0	123
	Alternativo	63	45	80	10	3,0	108

4.2. Ensaio em Escala Industrial

Em todos os ensaios, o ciclone padrão foi montado com a mesma configuração. Já no ciclone alternativo, foram empregados “vortex finders” de 10” e 12”, mantendo-se entretanto, constantes os valores de “inlet” de 60 pol² e “apex” de 4,5 pol. A Tabela II apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela II – Resultados experimentais.

Ensaio n.º	Ciclone	Concentrações de sólidos (%)			Pressão (psi)
		Alim.	OF	UF	
1 **	Padrão *	62	50	81	12
	Alternativo		44	81	
2 ***	Padrão	66	54	80	12
	Alternativo		51	81	
3	Padrão	67	53	80	11
	Alternativo		52	80	
4	Padrão	67	57	81	11
	Alternativo		52	80	
5	Padrão	66	51	80	12
	Alternativo		50	80	
6	Padrão	62	48	79	12
	Alternativo		46	79	

* Ciclone padrão, montado em todos os ensaios com “inlet” de 60 pol², “vortex” de 10 pol e “apex” de 4,5 pol

**Ciclone alternativo, modelo DS26-gMAX montado nos ensaios 1, 4 e 5 com “inlet” de 60 pol², “vortex” de 10 pol e “apex” de 4,5 pol

***Ciclone alternativo, modelo DS26-gMAX montado nos ensaios 2, 3 e 6 com inlet de 60 pol², “vortex” de 12 pol e “apex” de 4,5 pol

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise foi conduzida em termos de comparações entre os resultados simulados no programa PAPCKEB, da Krebs Engineers, e experimentais, calculados a partir dos ensaios de campo, no programa JKSimMet. Os principais parâmetros analisados e comparados foram aqueles relativos ao desempenho dos ciclones, como partições de sólidos e de água, valores d_{50cor} , d_{80} e d_{95} , assim como α , associado à inclinação da curva de partição. A verificação da qualidade dos resultados dos ensaios foi dividida em duas etapas, referentes a cada módulo específico de análise de desempenho: balanço de massas e parametrização da curva de partição.

5.1 Balanços de Massas e Ajustes das Curvas de Partição

Para a verificação da qualidade dos resultados dos ensaios, foi utilizada como referência a somatória dos desvios ponderados associados aos parâmetros relevantes ao cálculo do balanço de massas. A consistência dos resultados de um balanço de massas não garante, necessariamente, a parametrização adequada da curva de partição correspondente, pois a aderência dos dados experimentais ao modelo paramétrico adotado dependerá de sua dispersão em relação à curva que melhor se ajuste a eles, sendo esta uma função da parametrização adotada. Neste trabalho, foi adotada a equação paramétrica de Whiten, aplicada no modelo de Lynch; Rao (1975).

Para a estimação da aderência dos resultados experimentais ao modelo adotado, para o ajuste das curvas de partição, foi utilizada a somatória dos desvios ponderados referentes (a) ao balanço de massas, (b) pressão de alimentação, (c) diâmetro mediano de partição e (d) desvio relativo à porcentagem de água alimentada que se reporta ao “overflow”, representado por $\lambda(100 \cdot (1 - R_p))$.

Os valores analisados no programa JKSimMet podem ser considerados consistentes quando os desvios ponderados das somatórias forem inferiores a 20 para os balanços de massas e a 1,0 para os ajustes das curvas de partição. A análise dos resultados indicou que todos os ensaios apresentaram valores consistentes para os balanços de massas e ajustes das curvas de partição e, de acordo com o critério estabelecido, foram considerados aceitáveis para o trabalho proposto.

5.2. Comparação dos Resultados – Balanço de Massas

Na Tabela 3, a seguir, são apresentados os resultados dos balanços de massas simulados e experimentais, para as concentrações de sólidos, na alimentação, “overflow” e “underflow”, a recuperação em massa, em relação à massa total alimentada – R_s , assim como para a recuperação de água, em relação ao total de água alimentada – R_f . Com base nos valores listados na Tabela III, foram calculadas as médias e os desvios para as recuperações de sólidos e de água, conforme apresenta a Tabela IV.

Tabela III – Balanço de massas. Simulações prévias e resultados dos ensaios.

Ensaio n.º	Ciclone	Simulação prévia					Resultado dos ensaios				
		C_w (%)			R_s (%)	R_f (%)	C_w (%)			R_s (%)	R_f (%)
		Alim.	OF	UF			Alim.	OF	UF		
1	Padrão *	62,5	47,3	80,0	59,5	24,8	62,2	49,7	80,8	52,2	20,4
	Altern. **	62,5	42,5	80,0	68,2	28,4	62,2	43,5	80,9	64,9	25,2
2	Padrão	62,5	47,3	80,0	59,5	24,8	66,4	54,2	80,4	56,5	27,3
	Alternativo	62,5	45,3	80,0	63,5	26,5	66,5	51,2	80,9	62,7	29,4
3	Padrão	62,5	47,3	80,0	59,5	24,8	67,2	53,3	80,5	61,3	30,5
	Alternativo	62,5	45,3	80,0	63,5	26,5	67,3	52,5	80,4	63,3	31,7
4	Padrão	62,5	47,3	80,0	59,5	24,8	66,8	56,8	80,7	50,6	24,4
	Alternativo	62,5	42,5	80,0	68,2	28,4	66,8	51,7	80,4	63,2	30,9
5	Padrão	62,5	47,3	80,0	59,5	24,8	65,5	50,8	79,7	62,0	29,9
	Alternativo	62,5	42,5	80,0	68,2	28,4	65,5	49,9	79,5	64,0	31,3
6	Padrão	62,5	47,3	80,0	59,5	24,8	62,3	47,7	78,9	59,2	26,2
	Alternativo	62,5	45,3	80,0	63,5	26,5	62,3	45,8	79,0	63,0	27,7

Tabela IV – Valores médios e desvios obtidos no cálculo das recuperações de sólidos e água.

Ciclone	R_s (%)		R_f (%)		Desvio – R_s (%)	Desvio – R_f (%)
	Simulado	Experimental	Simulado	Experimental		
Padrão	59,5	57,0	24,8	26,4	- 4,2	- 3,6
Alternativo	65,9	63,5	27,5	29,4	+ 6	+ 7

Da análise dos resultados da Tabela IV, observou-se que 100% dos desvios obtidos para as recuperações de sólidos situaram-se no intervalo de $\pm 5\%$, estabelecido como aceitável para a análise deste parâmetro. Analogamente, 100% dos desvios obtidos pela comparação das recuperações de água situaram-se no intervalo de $\pm 10\%$, admitido como aceitável.

5.3. Comparação dos Resultados – Ajuste da Curva de Partição

Uma vez determinado o balanço de massas referente a cada ensaio, passou-se a analisar os parâmetros relativos ao ajuste das curvas de partição: o diâmetro mediano de partição (d_{50cor}) e o α , associado à sua inclinação. Também foram obtidos os valores d_{95} e d_{80} , uma vez que estes são obtidos em função da curva de partição.

Na Tabela V, mostrada a seguir, são apresentados os resultados dos valores dos parâmetros α , d_{50cor} , d_{80} e d_{95} , simulados e experimentais. Essa mesma tabela apresenta as médias aritméticas para os parâmetros selecionados simulados e experimentais, assim como os desvios percentuais.

Tabela V – Valores de α , d_{50cor} , d_{80} e d_{95} , simulados e experimentais. Médias e Desvios.

Ciclone	Parâmetro		Ensaio						Média	Desvio (%)
			1	2	3	4	5	6		
Padrão	α	Simulado	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	-57
		Experim.	2,2	1,7	0,75	0,73	1,1	1,4	1,3	
	d_{50cor}	Simulado	123	123	123	123	123	123	123	25
		Experim.	127	146	156	218	137	141	154	
	d_{80}	Simulado	123	123	123	123	123	123	123	13
		Experim.	105	127	157	164	148	132	139	
	d_{95}	Simulado	188	188	188	188	188	188	188	19
		Experim.	167	203	258	280	227	208	224	
Alternativo	α	Simulado	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	-72
		Experim.	1,2	0,87	0,48	0,67	0,57	1,2	0,83	
	d_{50cor}	Simulado	92	108	108	92	92	108	100	19
		Experim.	85	117	146	122	120	122	119	
	d_{80}	Simulado	97	111	111	97	97	111	104	32
		Experim.	95	130	165	147	157	128	137	
	d_{95}	Simulado	150	175	175	150	150	175	162	37
		Experim.	161	212	281	236	250	206	224	

Da análise dos resultados mostrados na Tabela V, observou-se que os desvios oriundos da comparação situaram-se fora das faixas estabelecidas como aceitáveis. Portanto, todos os desvios foram considerados inadequados.

5.4. Comparação dos Resultados – Curvas de Partição Corrigidas

A partir dos resultados simulados e experimentais dos parâmetros d_{50cor} e α , foram elaboradas as curvas de partição comparativas, apresentadas na Figura 1, a seguir. Os resultados simulados originaram as curvas de partição estimadas, através das simulações prévias, no programa PAPCKEB, enquanto os experimentais geraram as curvas de partição calculadas, a partir dos dados experimentais, parametrizados no programa JKSimMet.

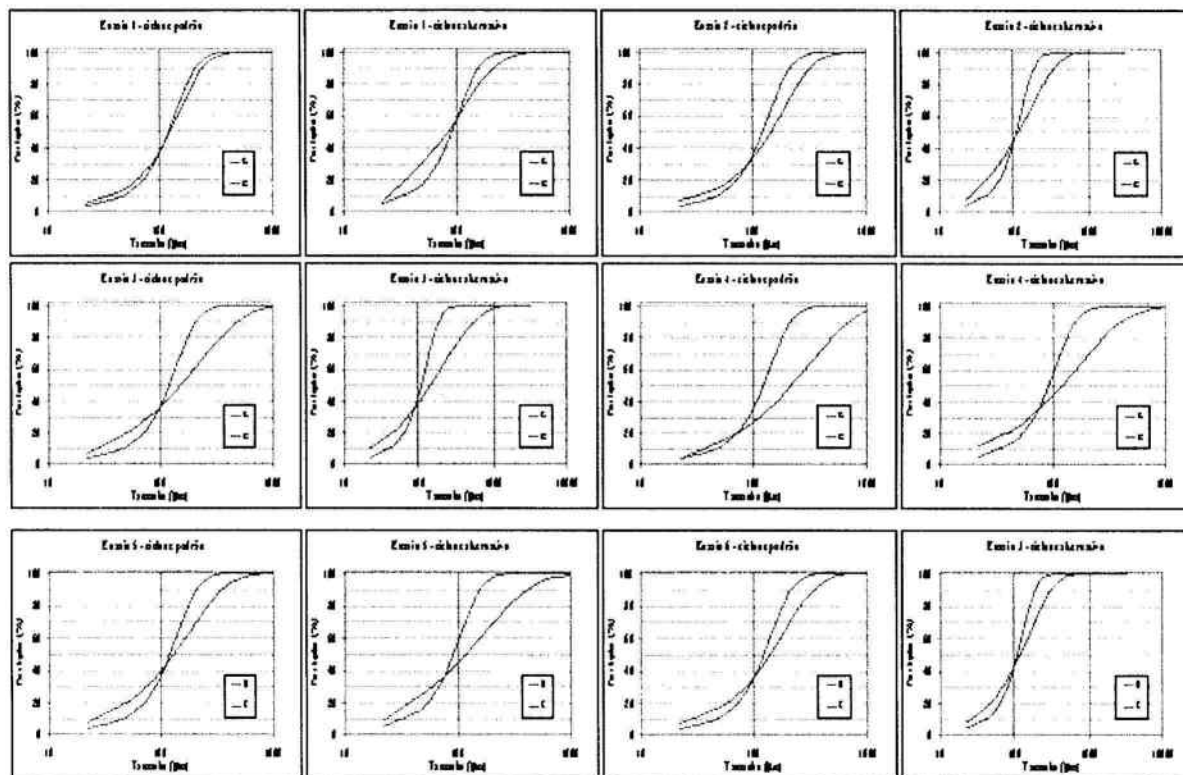


Figura 1 – Curvas de partição corrigidas, simuladas e experimentais, para cada ensaio.
E – curva de partição estimada (simulada); C – curva de partição calculada (experimental).

5.5. Análise do método de dimensionamento proposto por Arterburn

O método de dimensionamento de ciclones, proposto por Arterburn (1982), estabeleceu fórmulas para o cálculo dos valores d_{50cor} , d_{80} e d_{95} . Entretanto, não se conhece trabalho publicado que ratifique a validade das relações acima referidas. No presente trabalho, os dados experimentais, considerados consistentes de acordo com os critérios estabelecidos, foram empregados para analisar este método.

O método proposto por Arterburn está baseado em três relações. A primeira estabelece o cálculo do d_{50cor} para a operação estudada em função de valores padronizados e três fatores dependentes da concentração de sólidos na alimentação do ciclone, peso específico dos sólidos e pressão de operação do ciclone. As outras duas relações referem-se ao cálculo de parâmetros da distribuição granulométrica do “overflow” em função do d_{50} da curva de partição. A Tabela VI, a seguir, apresenta os valores d_{50cor} , d_{80} e d_{95} experimentais e calculados a partir do método de Arterburn.

Tabela VI – Valores d_{50cor} , d_{80} e d_{95} experimentais e calculados segundo Arterburn.

Ensaio n.º	Ciclone	d_{50cor} (µm)		d_{80} (µm)		d_{95} (µm)	
		Arterburn	Exp	Arterburn	Exp	Arterburn	Exp
1	Padrão	94	127	75	105	207	167
	Alternativo	94	85	75	95	207	161
2	Padrão	122	146	98	127	268	203
	Alternativo	122	117	98	130	268	212
3	Padrão	132	156	106	157	290	258
	Alternativo	132	146	106	165	290	281
4	Padrão	127	218	102	164	279	280
	Alternativo	127	122	102	147	279	236
5	Padrão	114	137	91	148	251	227
	Alternativo	114	120	91	157	251	250
6	Padrão	95	141	76	132	209	208
	Alternativo	95	122	76	128	209	206

A Tabela VII, a seguir, apresenta a comparação entre as médias aritméticas dos valores d_{50cor} , d_{80} e d_{95} experimentais e calculados pelo método de Arterburn. Também foram calculados os desvios, percentuais, sendo o valor simulado aquele calculado segundo Arterburn.

Tabela VII – Valores médios e desvios obtidos para os parâmetros d_{50cor} , d_{95} e d_{80} experimentais e calculados segundo o método de Arterburn.

Média aritmética	Minério de ferro	
	D26B-1086	DS26-gMAX
d_{50cor} Arterburn	114	114
d_{50cor} experimental	154	119
d_{80} Arterburn	91	91
d_{80} experimental	139	137
d_{95} Arterburn	251	251
d_{95} experimental	224	224
Desvio – d_{50cor} (%)	+ 35	+ 4
Desvio – d_{80} (%)	+ 53	+ 51
Desvio – d_{95} (%)	- 11	- 11

Da análise dos resultados mostrados na Tabela VII, observou-se que os desvios oriundos da comparação entre os valores d_{50cor} , d_{80} e d_{95} experimentais e calculados pelo método de Arterburn foram inadequados. Com relação ao parâmetro d_{50cor} , em 50% dos casos, os desvios apresentaram-se maiores que o limite de + 10%, estabelecido como aceitável na análise. Já para os parâmetros d_{80} e d_{95} , na totalidade dos casos, os desvios situaram-se acima do limite de + 10%, estabelecido como aceitável na análise.

5.6. Discussão dos Resultados

Para os demais parâmetros, os valores obtidos mostraram-se, quase que na totalidade, fora dos intervalos de desvio estabelecidos como aceitáveis. A simples observação das curvas de partição corrigidas, apresentadas na Figura 1, demonstra claramente estas diferenças. Tal constatação demonstra a dificuldade de estimação de alguns parâmetros, como o α , e de cálculo prévio de outros, como os valores d_{50cor} , d_{95} e d_{80} , através de simulações em programas ou do método de Arterburn.

Para operações de análise extremamente complexa, como a ciclonagem, a avaliação do desempenho através de programas de simulação, sem a comprovação prática através de ensaios experimentais, representa tarefa bastante árdua. Em algumas aplicações, mesmo onde se disponham de dados de operações similares, os valores simulados e experimentais tendem a apresentar diferenças, muitas vezes extremamente significativas à análise do desempenho do ciclone.

6. CONCLUSÕES

Com base no tratamento de dados e nas análises efetuadas, concluiu-se que os resultados obtidos nas simulações prévias foram inadequados, quando comparados com os experimentais, pois:

- Somente aqueles referentes às recuperações de sólidos e água apresentaram desvios aceitáveis;
- Para os parâmetros d_{50cor} , d_{80} , d_{95} e α , em todos os ensaios, os valores se apresentaram fora das faixas de desvios aceitáveis.

O método de dimensionamento proposto por Arterburn não se mostrou apropriado para o cálculo prévio dos parâmetros analisados, pois:

- Para o diâmetro mediano de partição, somente em 50% dos casos, os valores calculados situaram-se dentro dos limites aceitáveis;
- Para os valores d_{80} e d_{95} , na totalidade dos casos, os desvios situaram-se fora das faixas limite, estabelecidas como aceitáveis.

Esta foi considerada a principal conclusão deste trabalho, por ser este método um dos mais empregados em dimensionamentos e projetos preliminares.

Face às significativas diferenças apresentadas entre os resultados simulados e experimentais, há a necessidade da execução de ensaios, para a maior confiabilidade da análise de operações de ciclonagem.

Conclui-se assim que os programas de simulação e os métodos de cálculo prévios, como o proposto por Arterburn, apesar de representarem importante recurso de auxílio em etapas preliminares do projeto, devem ser utilizados de forma cuidadosa, evitando-se incoerências de avaliação e a sua supervalorização;

7. REFERÊNCIAS

- Arterburn, R. A. The sizing and selection of hydrocyclones. In: MULAR, A. L.; JERGENSEN II, G. V. **Design and Installation of Comminution Circuits**. New York, SME/AIME, 1982. p. 592-607.
- Chaves, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus Editora, 1996. p. 151-235: Classificação.
- Delboni Junior, H. **Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones**. 1989. 182 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Lynch, A. J.; Rao, T. C. Modelling and scale-up of hydrocyclone classifiers. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11., Cagliari, 1975. **Proceedings**. Cagliari: Instituto di Arte Mineraria, 1975. p. 245-269.