



Avaliação de Separadores Ciclônicos na Coleta de Finos de Minério de Ferro

JOAO G. A. AGUIAR^{1*}, LUANA B. GENARO¹, ALFREDO M. SARKIS², THIAGO C. SOUZA PINTO³, VÁDILA G. G. BÉTTEGA¹, RODRIGO BÉTTEGA¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Departamento de Engenharia Química

²ITV, Instituto Tecnológico Vale

³Centro de Desenvolvimento Mineral

*joaoaguiar@estudante.ufscar.br

RESUMO - O ferro está diretamente relacionado ao desenvolvimento de um país, sendo elemento chave na confecção de diversos utensílios de uso diário. Uma das etapas fundamentais de seu beneficiamento é a adequação de seu conteúdo de umidade. Neste sentido, a secagem convectiva do minério de ferro acarreta o arraste de particulados finos, gerando a necessidade de sua recuperação. Desta maneira, este estudo buscou avaliar a eficiência de diferentes configurações de separadores ciclônicos para esta finalidade. Os ciclones, por sua vez, são equipamentos de separação gás-sólido com princípio de ação fundamentado na força centrífuga gerada pelo escoamento do gás em seu interior, induzindo as partículas maiores a serem majoritariamente coletadas no *underflow* e liberando o gás pelo *overflow*, contendo uma pequena fração de particulado fino. Dados experimentais de caracterização do minério de ferro, testes de separação realizados em unidade reduzida e modelos de queda de pressão e eficiência de coleta presentes na literatura foram utilizados para avaliação de três ciclones em nove condições operacionais. Os resultados experimentais indicam recuperação máxima do material na casa de 83%, utilizando o ciclone C₁ na condição de maior velocidade testada. As correlações clássicas da literatura utilizadas apresentaram desvios com relação aos dados experimentais obtidos.

INTRODUÇÃO

A mineração em conjunto com a indústria siderúrgica constitui uma das atividades essenciais no desenvolvimento do mundo contemporâneo. Nesse contexto, o Brasil, por sua diversidade mineral e extensão territorial detém posição de destaque competitivo no cenário mundial quando se trata de reservas e produção de bens minerais. Destacam-se os bens minerais metálicos, que correspondem a mais de 91% das exportações de bens minerais do país, sendo o ferro e o ouro os mais importantes em termos econômicos (Salomão, 2015).

Um fator importante para adequação do mineral para sua devida utilização e transporte é seu conteúdo de umidade, o qual se relaciona com a chamada TML – *Transportable Moisture Limit*. A TML, por sua vez, expressa o limite máximo permissível de umidade presente no minério para que seja possível seu transporte naval seguro (Munro; Mohajerani, 2015).

Recentemente, pesquisas envolvendo a secagem convectiva do minério de ferro vem sendo conduzidas, de modo a atender a TML e potencializar a qualidade do produto final (ITV, 2016). Contudo, a passagem do ar acarreta arraste do particulado fino, gerando uma corrente gás-sólido que deve ser separada, a fim de possibilitar o aproveitamento do material e evitar sua emissão ao ambiente.

Um equipamento largamente utilizado para limpeza de gases são os separadores ciclônicos, em virtude de sua simples construção, manutenção e capacidade de operar em condições extremas de temperatura, pressão e vazão (Hoffmann; Stein, 2002). Seu mecanismo de ação é alicerçado na intensa força centrífuga gerada pelo escoamento do gás através da geometria do equipamento (Corry *et al.*, 2004). Este fenômeno, em conjunto com a força gravitacional atuante sobre o material sólido, promove a coleta do particulado no *underflow*, enquanto a corrente gasosa é expelida pelo *overflow*, com uma pequena fração de particulado mais fino.

A performance de um ciclone é normalmente indicada pela queda de pressão operacional e eficiência de separação do sólido. Além disso, é comum analisar as influências das condições geométricas e operacionais do ciclone, buscando otimizar os parâmetros de performance. Neste sentido, o estudo de Brar *et al.* (2015) demonstraram que a altura do corpo cilíndrico do ciclone afeta intimamente a queda de pressão, gerando sua redução conforme se aumenta a altura cilíndrica. Por outro lado, o aumento de altura da parte cônica também se relaciona a um incremento considerável na eficiência de coleta do ciclone. Conclusões análogas foram obtidas por Brar e Shastri (2020).

Gimbun *et al.* (2004) examinaram os efeitos de diversas variáveis tais como temperatura, densidade do material sólido e velocidade de entrada na eficiência de separação do ciclone. Em suma, foram obtidos melhores fatores de coleta conforme aumentava-se a velocidade de alimentação da mistura e massa específica do particulado. Em contrapartida, elevados valores de temperatura se relacionaram à diminuição da performance da separação.

Morin *et al.* (2021) investigaram os efeitos da concentração de sólidos na corrente de alimentação e da razão de aspecto do bocal de entrada na eficiência de coleta do ciclone. Foi constatado que o aumento da concentração de sólidos influenciou positivamente na separação global do ciclone. Além disso, foi demonstrado que a separação do sólido é altamente favorecida conforme o incremento da razão de aspecto. Em seus estudos, Wasilewski

(2016) também apontou o incremento do fator de eficiência influenciado pelo aumento da concentração de sólidos na corrente de tratamento.

Neste trabalho foram avaliados três separadores ciclônicos para coleta do minério de ferro proveniente da operação de secagem, buscando analisar a influência das principais variáveis operacionais e geométricas na performance de separação.

MATERIAIS

Minério de ferro

O material alvo de estudo deste trabalho foi cedido pelo ITV, sendo proveniente da região do Carajás, sendo assim um minério rico em conteúdo férrico, típico dos depósitos de *hematita* característicos desta região. Tal característica provê ao mineral uma elevada massa específica, com média de $4,5542 \text{ g/cm}^3$, obtida através de ensaio em picnômetro de volume (referencial) de 25 ml e utilizando o xileno como solvente.

Buscando utilizar como material de trabalho apenas a fração mais fina do minério de ferro, sendo aquela que majoritariamente será carregada devido a passagem do ar na operação de secagem, o minério de ferro foi inicialmente seco em estufa por um período de 24 h à 105°C e, então, submetido a tratamento em um sistema de peneiras sobre agitação. Para tal, foram utilizadas peneiras da série Tyler, retirando a fração mais fina ($< 500 \mu\text{m}$) para realização dos experimentos de separação. Cabe destacar que ainda não existem dados O procedimento é ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Frações de tamanho obtidas do minério de ferro bruto após operação de peneiramento.

Unidade experimental

Na Figura 2 é apresentado um esquema representativo da unidade experimental usada nos experimentos de separação.

O ar é alimentado no sistema através de um soprador radial de 7 HP (1). Sua vazão é então regulada para entrada no ciclone através do conjunto de válvulas globo (2) e de um anemômetro de fio quente AKSO® utilizado na posição 4 para aferição da velocidade do ar, sendo posicionado no centro radial da tubulação de diâmetro de 4,86 cm. Ressalta-se aqui também a divisão da alimentação do ar em duas correntes, uma de tratamento e outra secundária (*by-pass*), contribuindo para a segurança e regulagem da unidade. A alimentação do minério é então realizada no ponto 3 da linha, através de um alimentador (6) composto por um disco rotativo, que opera com ar comprimido e um Venturi à pressão manométrica padronizada de 2 kgf/cm².

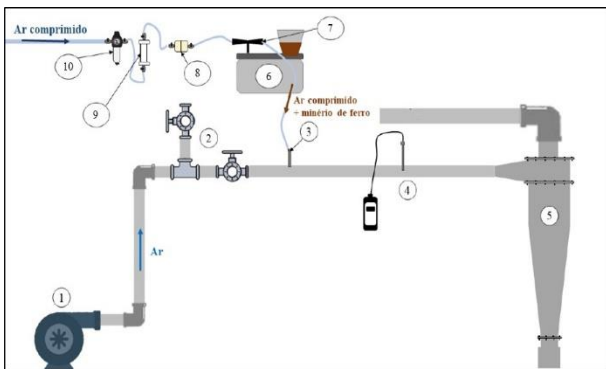


Figura 2: Ilustração da unidade experimental utilizada.

No sistema de alimentação de sólido em questão, o ar comprimido passa por um regulador de pressão (10), permeando então um meio poroso (9) constituído de partículas de sílica para remoção de sua umidade residual. Em sequência, o ar escoar através de uma membrana porosa (8) responsável por remover as partículas sólidas contaminantes, como a poeira. Posteriormente, ao escoar pelo eixo horizontal do Venturi (7), o ar promove uma região de baixa pressão no eixo vertical do aparato, responsável por aspirar as partículas minerais presentes no desnível do disco rotativo. A mistura ar-minério é então alimentada na linha de tratamento.

As propriedades do ar, como velocidade e temperatura, são aferidas então no ponto 4. No *underflow* do ciclone, a caixa coletora revestida internamente por um saco coletor, é utilizada para contenção do material particulado coletado. Além disso, para determinação da queda de pressão dos ciclones, foi utilizado um micro-manômetro AXD 530 AKSO® para

medição da diferença de pressão entre as seções de entrada e exaustão gasosa.

Neste trabalho, foram utilizados três separadores ciclônicos modificados da família *Stairmand*, de modo a verificar a influência da razão $[h_{cc}/D_c]$. Assim sendo, todas as cotas geométricas dos três ciclones são idênticas, com exceção da altura do corpo cilíndrico (h_{cc}) e, conseqüentemente, da altura do corpo cônico. Cabe destacar que as modificações mais expressivas dos ciclones de trabalho com relação a um *Stairmand* padrão estão na proporção das alturas do corpo cilíndrico e cônico e na profundidade do bocal do *overflow* (S). As cotas geométricas de destaque dos três ciclones podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões geométricas dos três ciclones avaliados.

Ciclone / Cota [cm]	C ₁	C ₂	C ₃
a	10,5	10,5	10,5
b	5,5	5,5	5,5
D _c	24,6	24,6	24,6
H _t	102,8	102,8	102,8
h _{cc}	40,5	65,0	15,5
D _e	10,0	10,0	10,0
S	57,8	57,8	57,8
B	9,0	9,0	9,0

Tomando como base os valores expressos na Tabela 1, sabe-se que as razões $[h_{cc}/D_c]$ são **1,65**, **2,64** e **0,63**, respectivamente para os ciclones C₁, C₂ e C₃. Adicionalmente, é inserida a Figura 3 para melhor demonstrar a proporção geométrica entre os ciclones.

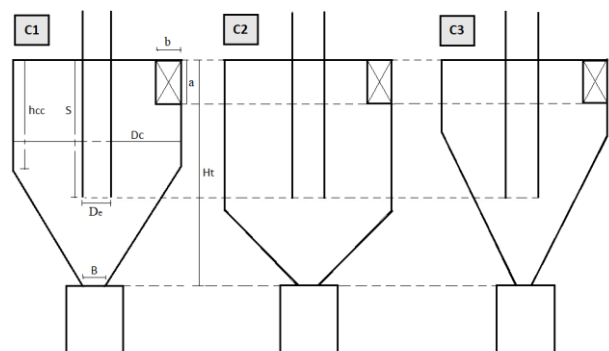


Figura 3: Ilustração das relações geométricas dos ciclones.

Procedimento experimental

Inicialmente, o disco do alimentador de sólidos era preenchido, utilizando para tal uma massa padronizada próxima de 14 g de material. Então, foi realizado o ajuste das condições operacionais da unidade, conforme apresentado na Tabela 2. Desta maneira, foram avaliadas 9 condições experimentais para cada ciclone, considerando as combinações das variáveis apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Condições experimentais avaliadas.

Velocidade do Ar [m/s]	Vazão de Sólidos [g/s]
10	0,11296
20	0,23206
30	0,34611

Uma vez preparada a unidade e acoplada a caixa coletora ao ciclone, o ensaio era iniciado, cronometrando-se o tempo de alimentação, para devida aferição da vazão mássica de alimentação do minério. Terminado o ensaio, a massa coletada na caixa era então pesada e, desta forma, determinada a eficiência de separação do ensaio. Cabe destacar que para cada condição experimental, foram realizadas seis réplicas.

METODOLOGIA APLICADA

Caracterização do minério

O minério de ferro fino foi encaminhado para análise em um equipamento *Malvern Mastersizer* para determinação de sua distribuição granulométrica. A distribuição granulométrica obtida pode ser observada na Figura 4.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 4, observa-se uma quantidade considerável de material na zona sub-micrômica ($< 1 \mu\text{m}$), sendo um material de difícil separação através de ciclones. Contudo, percebe-se um diâmetro mediano em torno de $100 \mu\text{m}$, o que estimula o uso do equipamento de separação. Pois, como destacado por Coury *et. al.* (2004), se bem projetados, ciclones são capazes de coletar partículas maiores que $10 \mu\text{m}$ com bons valores de eficiência.

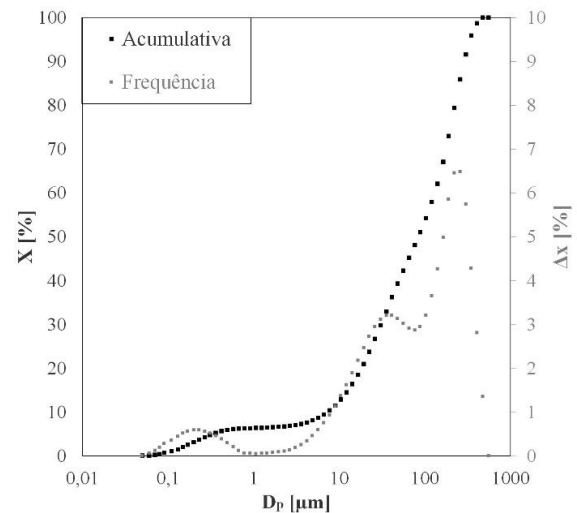


Figura 4: Distribuição granulométrica do minério de ferro.

Modelos da literatura

As correlações apresentadas no Quadro 1 foram utilizadas para estimar a queda de pressão e a eficiência de coleta global dos ciclones avaliados, utilizando uma fase fluida com massa específica de $1,1364 \text{ kg/m}^3$. A partir dos resultados experimentais e teóricos fornecidos pelos modelos abaixo, o desvio de uma determinada propriedade θ foi definido de acordo com a Equação 1.

$$\delta = \frac{|\theta_{\text{experimental}} - \theta_{\text{teórico}}|}{\theta_{\text{experimental}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Tratamento estatístico

Para verificar a tendência estatística dos resultados de eficiência de coleta foi utilizado o teste de hipótese t de *Student*. Universalmente conhecido por sua vasta aplicação, o teste t utiliza conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma certa hipótese nula, sendo aplicada quando os dados tratados seguem uma distribuição normal. Alternativamente, como neste caso de análise, em que não se conhece a variância da população de dados, o método utiliza uma variância amostral, desta maneira, fazendo um ajuste na população que passa a apresentar uma distribuição t *Student*.

O tratamento estatístico foi realizado no software Excel® utilizando, inicialmente, o teste F para averiguar a relação entre as variâncias dos dois conjuntos de dados avaliados. A depender do resultado da estatística f , sendo inferior ou superior ao f crítico, utilizava-se respectivamente o teste t para amostras de variâncias equivalentes ou para variâncias diferentes.

Quadro 1: Modelos utilizados para avaliação teórica da eficiência de coleta e queda de pressão dos ciclones.

Referência	Detalhamento do Modelo
Massarani (2002)	- Velocidade média do fluido na seção cilíndrica do ciclone: $u_c = \frac{Q}{\pi D_c^2/4} \quad (2)$
	- Queda de Pressão: $\Delta P = \beta \rho_f u_c^2/2 \quad (3)$ $\beta = 400$ para $10 <$ velocidade de alimentação do ar < 30 m/s
	- Parâmetro Geométrico $\Delta H = 11,3 \left(\frac{ab}{D_c^2}\right)^2 + 3,33 \quad (4)$
(CASAL, J.; BENET, J.M., 1983)	- Queda de Pressão: $\Delta P = \frac{\rho_f \cdot v_i^2}{2} \cdot \Delta H \quad (5)$
Massarani (2002)	- Modelo de distribuição granulométrica RRB: $X = 1 - e^{-\left(\frac{D_i}{D^*}\right)^n} \quad (6)$
	- Diâmetro de Corte: $\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho_f)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$ $K = 0,041$ p/10 < velocidade de alimentação < 30 m/s
	- Eficiência global de coleta obtida utilizando o modelo de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennet (RRB): $\eta = \left(\frac{\frac{1,11n}{0,118 + n}}{1,81 - 0,322n + \frac{D'}{D^*}} \right) \left(\frac{D'}{D^*} \right) \quad (8)$
Barth (1956)	- Parâmetros do modelo: $\alpha = 1 - 1,2(b/D_c) \quad (9)$
	$v_0 = \frac{4Q}{\pi D_e^2} \quad (10)$
	Se $De \leq B$: $h^m = H_t - S \quad (11)$
	Se $De \geq B$: $h^m = \frac{(H_t - h_{cc})(D_c - D_e)}{(D_c - B)} + (h_{cc} - S) \quad (12)$
	$v_{t,max} = v_0 \left[\frac{(D_e/2)(D_c - b)\pi}{2ab\alpha + h^m(D_c - b)\pi\lambda} \right] \quad (13)$
	$\frac{v_{ts}}{v_{ts}^m} = \frac{\pi h^m \rho_s v_{t,max}^2 D_i^2}{9\mu Q} \quad (14)$
- Eficiência individual de coleta: $\eta_i = \frac{1}{\left[1 + \left(v_{ts}/v_{ts}^m \right)^{-3,2} \right]} \quad (15)$	
- Eficiência global de coleta: $\eta = \int_0^1 \eta dX \quad (16)$	

Então, analisando-se o valor da estatística t, podendo ser inferior ou superior ao t crítico disponibilizado no método, a hipótese nula (H_0) era aceita ou rejeitada, nesse último caso, assumindo a hipótese alternativa (H_1).

Por fim, cabe destacar que a hipótese nula no caso de análise deste trabalho é a igualdade estatística entre as médias dos dois conjuntos de dados e, a hipótese alternativa, relaciona-se com a desigualdade das médias, podendo a média do conjunto hipotético de dados 1 ser inferior ou superior a do conjunto 2. Tomando como exemplo a verificação da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de separação dos ciclones, a hipótese nula seria equivalente à consideração de que, estatisticamente a um nível de significância de 5%, não houve mudança observável na média dos resultados de eficiência. Enquanto que, a hipótese alternativa, seria dizer que houve incremento ou decremento da eficiência de separação com a variação da velocidade do ar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabela 3, 4 e 5 podem ser observados os resultados experimentais para eficiência global de coleta para os ciclones C_1 , C_2 e C_3 , respectivamente.

Analisando as Tabelas 3, 4 e 5, levando-se em consideração apenas a média exata dos resultados, é possível observar que para os três ciclones, o incremento da velocidade de alimentação do ar favoreceu o processo de separação do minério de ferro, mantendo-se constante a vazão de alimentação do mesmo. Tal comportamento está de acordo com as observações constatadas por Gimbum *et. al.* (2004) e Zhu e Lee (1999).

Por outro lado, observando a eficiência de coleta com relação à variação da vazão mássica de sólidos, é possível verificar uma influência mínima entre essas variáveis. Tal fato está associado a elevada diluição da fase sólida na corrente de tratamento, devido às próprias limitações do sistema de alimentação utilizado na unidade experimental.

Levando-se em consideração os resultados das Tabelas 3, 4 e 5, para uma mesma condição operacional de velocidade e vazão mássica de sólidos, pode-se observar

uma pequena influência da relação entre as alturas cilíndrica e cônica dos ciclones na eficiência de separação do minério de ferro. Contudo, não foi possível identificar o efeito comentado por Brar *et. al.* (2015), pois, para tal, deveria ser notável uma eficiência de coleta superior para o ciclone C₃, o que não foi observado na prática. Este comportamento pode estar relacionado a elevada massa específica do material sólido analisado, que acaba por suprimir em grande parte o efeito da razão $[h_{cc}/D_c]$ no fator de coleta.

Tabela 3: Resultados de eficiência de coleta de C₁.

V _{Ar} [m/s]	m _s [g/s]	C [g _{sólido} /m ³ _{ar}]	η []
10,03	0,11398	6,12584	0,68827
±	±	±	±
0,03	0,00083	0,05633	0,01685
20,02	0,11367	3,06062	0,81446
±	±	±	±
0,04	0,00106	0,02773	0,02039
30,03	0,11406	2,04775	0,83196
±	±	±	±
0,03	0,00130	0,02325	0,00881
10,03	0,23120	12,43210	0,68554
±	±	±	±
0,04	0,00136	0,07564	0,01724
20,04	0,23020	6,19316	0,80799
±	±	±	±
0,04	0,00192	0,05364	0,01573
30,01	0,22950	4,12241	0,83439
±	±	±	±
0,04	0,00149	0,03102	0,01059
10,05	0,34124	18,30358	0,68078
±	±	±	±
0,02	0,00570	0,31593	0,01868
20,03	0,34512	9,28987	0,80291
±	±	±	±
0,04	0,00675	0,18793	0,01938
30,03	0,34188	6,13668	0,83142
±	±	±	±
0,03	0,00567	0,10457	0,01610

Na Tabela 6 são apresentados os resultados para queda de pressão dos três ciclones, com os respectivos desvios com relação aos valores teóricos previstos pelos modelos da literatura utilizados. Cabe destacar que se trata da queda de pressão livre, ou seja, aquela isenta de particulado em sua medida. Avaliando os resultados da Tabela 6 é possível observar o comportamento para queda de pressão experimental constatado por Brar *et. al.* (2015), o aumento da altura do corpo cilíndrico provocou a diminuição da queda de pressão do ciclone, fazendo com que $\Delta P[C_2] < \Delta P[C_1] < \Delta P[C_3]$.

Tabela 4: Resultados de eficiência de coleta de C₂.

V _{Ar} [m/s]	m _s [g/s]	C [g _{sólido} /m ³ _{ar}]	H []
10,02	0,11412	6,14258	0,68763
±	±	±	±
0,04	0,00057	0,04970	0,02523
19,99	0,11383	3,06973	0,76456
±	±	±	±
0,02	0,00069	0,02131	0,03119
30,01	0,11401	2,04768	0,78219
±	±	±	±
0,04	0,00031	0,00643	0,03350
10,05	0,23036	12,36235	0,69793
±	±	±	±
0,04	0,00218	0,10332	0,00730
20,02	0,22940	6,17789	0,80266
±	±	±	±
0,04	0,00163	0,03788	0,01996
30,06	0,23129	4,14763	0,81836
±	±	±	±
0,02	0,00223	0,04069	0,00370
10,05	0,34636	18,65221	0,67714
±	±	±	±
0,03	0,00082	0,07034	0,01118
20,01	0,34371	9,25936	0,78026
±	±	±	±
0,02	0,00320	0,08201	0,01703
30,03	0,34146	6,12917	0,81864
±	±	±	±
0,02	0,00466	0,08160	0,01271

Tabela 5: Resultados de eficiência de coleta de C₃.

V _{Ar} [m/s]	m _s [g/s]	C [g _{sólido} /m ³ _{ar}]	H []
10,03	0,11249	6,04780	0,68529
±	±	±	±
0,03	0,00026	0,01661	0,01868
20,01	0,11306	3,04664	0,78181
±	±	±	±
0,03	0,00096	0,02252	0,01672
30,02	0,11426	2,05176	0,78538
±	±	±	±
0,05	0,00056	0,01176	0,01398
10,02	0,22998	12,37277	0,68931
±	±	±	±
0,03	0,00177	0,10902	0,00996
20,02	0,23166	6,23661	0,77407
±	±	±	±
0,03	0,00144	0,03515	0,01790
30,03	0,22902	4,11090	0,78326
±	±	±	±
0,03	0,00108	0,01960	0,01439
10,05	0,34424	18,46769	0,67837
±	±	±	±
0,03	0,00477	0,28703	0,01431
20,03	0,34425	9,26545	0,77691
±	±	±	±
0,03	0,00457	0,12643	0,01311
30,04	0,34104	6,12020	0,80387
±	±	±	±
0,02	0,00521	0,09624	0,01850

Tabela 6: Resultados para queda de pressão experimental x teórico.

Ciclone	V_{Ar} [m/s]	T_{Ar} [°C]	ΔP_0	ΔP_1	ΔP_2	δ_{0-1} [%]	δ_{0-2} [%]
			Experimental [Pa]	Massarani [Pa]	Casal & Benet [Pa]		
C ₁	10	36,1	16,5	34,62	20,13	109,83	21,98
	20	45,7	134	138,49	80,51	3,35	39,92
	30	47,7	262	311,60	181,14	18,93	30,86
C ₂	10	37,6	14	34,62	20,13	147,30	43,76
	20	43,7	111	138,49	80,51	24,77	27,47
	30	48,33	233	311,60	181,14	33,74	22,26
C ₃	10	37,7	24	34,62	20,13	44,26	16,14
	20	47,7	170	138,49	80,51	18,53	52,64
	30	48,7	378	311,60	181,14	17,57	52,08

Além disso, comparando-se os resultados experimentais em relação aos teóricos obtidos, é possível concluir que o modelo de Casal e Benet (1983) apresentou boa capacidade preditiva da queda de pressão para a condição de alimentação de 10 m/s, com desvios em torno de 20% para C₁ e C₃ e por volta de 40% para C₂. Por outro lado, o modelo de Massarani (2002) gerou resultados próximos ao experimental para as condições de alimentação de 20 e 30 m/s, com desvios no geral inferiores a 30%. Cabe destacar que os efeitos de variação de temperatura não foram levados em consideração nos cálculos teóricos, utilizando uma massa específica do ar na temperatura média das medidas experimentais.

Na Tabela 7 são mostrados os resultados teóricos e experimentais médios obtidos para a eficiência de coleta dos três ciclones, para cada condição de velocidade de alimentação do ar, além dos respectivos desvios.

Inicialmente, já é possível destacar pela

Tabela 7 um erro no geral inferior à 30% entre os resultados de eficiência de coleta experimentais e teóricos, sendo que os maiores desvios se concentraram na condição de alimentação de 10 m/s.

Esta discrepância pode estar associada a própria distribuição granulométrica do material. Uma vez que as eficiências globais foram determinadas a partir dos dados da distribuição, caso a presença de partículas de maior dimensão tenha sido superestimada, em detrimento das partículas menores, a eficiência global de coleta prevista pelo modelo também será superestimada. Assim sendo, é possível que uma nova caracterização granulométrica seja necessária, após um procedimento de amostragem adequado do material.

Além disso, o aumento da temperatura no interior dos ciclones também pode ter contribuído para diminuição dos fatores de eficiência experimentais, conforme destacado por Gimbum *et. al.* (2004).

Tabela 7: Resultados de eficiência de coleta experimental x teórico.

Ciclone	V_{Ar} [m/s]	η_0	η_1	η_2	δ_{0-1} [%]	δ_{0-2} [%]
		Experimental	Massarani	Barth		
C ₁	10	0,68486	0,91031	0,88951	31,18	29,88
	20	0,80845	0,91832	0,90989	13,46	12,55
	30	0,83259	0,92192	0,92034	11,33	10,54
C ₂	10	0,68757	0,91031	0,88970	30,64	29,40
	20	0,78249	0,91832	0,91030	17,25	16,33
	30	0,80639	0,92192	0,92054	14,95	14,15
C ₃	10	0,68432	0,91031	0,88900	31,26	29,91
	20	0,77759	0,91832	0,90945	17,94	16,96
	30	0,79084	0,92192	0,92001	17,21	16,33

Iniciando os resultados do teste t usado para avaliação estatística dos resultados experimentais, tem-se a Tabela 8, que mostra os resultados obtidos para influência estatística da velocidade de alimentação do ar na eficiência de coleta dos ciclones, a um nível de significância de 5%.

Tabela 8: Resultados do teste t para avaliação da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de coleta dos ciclones.

Ciclone	\dot{m}_s [g/s]	Stat t	$t_{\text{crítico}}$	Resultado
C ₁	0,11390 ± 0,00103	11,68384 1,92938	1,81246 1,89457	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_1: \eta [30] > \eta [20]$
	0,23030 ± 0,00167	12,85006 3,40968	1,81246 1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_1: \eta [30] > \eta [20]$
	0,34275 ± 0,00596	11,11242 2,77237	1,81246 1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_1: \eta [30] > \eta [20]$
	0,11399 ± 0,00053	4,69729 0,94350	1,81246 1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,23035 ± 0,00207	12,07065 1,89488	1,94318 2,01504	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,34384 ± 0,00372	12,40078 4,42435	1,81246 1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_1: \eta [30] > \eta [20]$
C ₃	0,11330 ± 0,00096	9,42908 0,40118	1,81246 1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,23022 ± 0,00177	10,13536 0,98013	1,81246 1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,34266 ± 0,00470	12,43689 2,91286	1,81246 1,83246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$ $H_1: \eta [30] > \eta [20]$

Conforme visto na Tabela 8, o comportamento anteriormente observado durante a análise das Tabelas 3, 4 e 5 foi estatisticamente constatado. Majoritariamente, os resultados observados mostram de fato o aumento do fator de eficiência de coleta em virtude do incremento da velocidade de alimentação do ar. Além disso, fica também claro uma tendência de estabilização dos resultados quando comparados os resultados de eficiência nas velocidades de 20 e 30 m/s, diminuindo muito o efeito da velocidade quando comparando os resultados nas velocidades de 10 e 20 m/s. Assim sendo,

velocidades superiores à 30 m/s não são aconselháveis para este processo em análise. Tal comportamento pode ser melhor observado no gráfico contido na Figura 5, exemplificado para o caso do ciclone C₁.

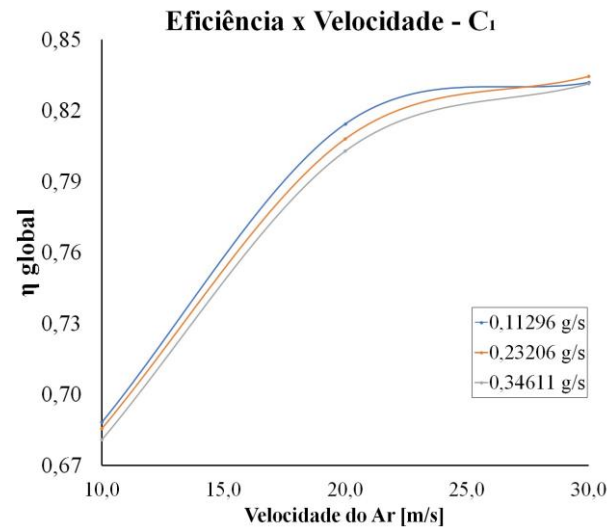


Figura 5: Comportamento da eficiência de coleta do ciclone C₁ em relação à velocidade de alimentação do ar, para as três vazões mássicas, demonstrando a tendência de estabilização dos resultados.

Na Tabela 9 pode-se observar os resultados do teste de hipóteses para avaliação da influência da vazão de alimentação de sólidos na eficiência de separação do material. O tratamento estatístico veio a confirmar o comportamento previsto pela análise inicial das tabelas 3, 4 e 5, indicando que a variação da vazão de alimentação de sólidos, no geral, não teve efeito algum sobre o fator de eficiência. Cabe destacar que este comportamento é válido dentro da faixa de vazão sólida comentada no escopo deste trabalho.

Por fim, na Tabela 10, podem ser observados os resultados da análise estatística utilizada para investigar a influência da razão $[h_{cc}/D_c]$, relacionada à variação geométrica dos três ciclones, na eficiência de separação do minério de ferro.

Os resultados da Tabela 10 indicam que a razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ teve considerável influência estatística nos resultados de eficiência de separação. Ainda que não tenha sido possível a verificação desse comportamento em toda a série de dados, nas condições dos testes 3, 5, 11 e 15, é observado que as separações mais eficazes foram resultantes da utilização do ciclone C₁. Já no caso da condição do teste 9, verifica-se que a

um grau de significância de 5% os resultados de C_1 e C_2 foram considerados iguais. Todavia, se levado em consideração os resultados das Tabelas 3, 4 e 5, a média da eficiência de C_1 foi superior à de C_2 nesta condição operacional. Assim sendo, no geral, foi possível destacar o ciclone de máxima eficiência para coleta do minério de ferro, no caso, o ciclone C_1 . Ou seja, a maior separação se deu no ciclone de razão $[h_{cc}/D_c]$ igual à 1,65.

Tabela 9: Resultados do teste t para avaliação da influência da vazão de alimentação de sólidos na eficiência de coleta dos ciclones.

Ciclone	V_{Ar} [m/s]	Stat t	$t_{crítico}$	Resultado
C_1	10,04 ± 0,03	0,27756 0,45846	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
	20,03 ± 0,04	0,61534 0,49850	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
	30,02 ± 0,03	0,43205 0,07152	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
	10,02 ± 0,04	0,96007 0,93184	1,94318 1,89457	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
	20,01 ± 0,03	1,08191 2,09122	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,34] = \eta[0,11]$ $H_1: \eta[0,23] > \eta[0,34]$
	30,04 ± 0,03	2,62870 0,05149	2,01504 1,94318	$H_1: \eta[0,23] > \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
C_2	10,04 ± 0,03	0,46496 0,71999	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
	20,02 ± 0,03	0,56519 0,31374	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_0: \eta[0,34] = \eta[0,23]$
	30,03 ± 0,04	0,25917 1,95296	1,81246 1,81246	$H_0: \eta[0,23] = \eta[0,11]$ $H_1: \eta[0,34] > \eta[0,11]$

Conforme já comentado anteriormente e, neste momento, reforçado pela análise da Tabela 10, o comportamento previsto por Brar *et. al.* (2015) e Brar e Shastri (2020) não foi verificado perante os três ciclones analisados. Pois, segundo as constatações dos autores, o ciclone de maior eficiência deveria ser C_3 , sendo aquele com maior altura do corpo cônico. Contudo, vale destacar que, como constatado por Gao *et. al.* (2012), quando o comprimento do bocal de exaustão encontra a seção cônica do ciclone, a eficiência tende a diminuir, mesmo em ciclones com alturas cônicas mais elevadas,

afetando principalmente C_3 , cuja penetração do bocal na seção cônica é maior. Assim sendo, o grande valor da profundidade (S) do bocal do *overflow* com certeza afetou os níveis de separação do minério.

Tabela 10: Resultados do teste t para avaliação da influência da razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ na eficiência de separação do minério de ferro.

Teste	Condição Var - m/s [m/s; g/s]	Stat t	$t_{crítico}$	Resultado
1	10,03 ± 0,03	0,05143	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_2]$
2	0,11372 ± 0,00092	0,18301	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$
3	20,02 ± 0,03	3,03247	1,81246	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_3]$
4	0,11372 ± 0,00092	1,19388	1,81246	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_2]$
5	30,03 ± 0,03	6,90262	1,81246	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_3]$
6	0,11372 ± 0,00092	0,21516	1,89458	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_2]$
7	10,03 ± 0,03	1,71064	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$
8	0,23029 ± 0,00181	0,46357	1,81246	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_1]$
9	20,02 ± 0,03	0,51391	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_2]$
10	0,23029 ± 0,00181	2,61217	1,81246	$H_1: \eta[C_2] > \eta[C_3]$
11	30,03 ± 0,03	3,50036	1,94318	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_2]$
12	0,23029 ± 0,00181	5,78466	1,81246	$H_1: \eta[C_2] > \eta[C_3]$
13	10,03 ± 0,03	0,25088	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_3]$
14	0,34326 ± 0,00485	0,16652	1,81246	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_2]$
15	20,02 ± 0,03	2,15066	1,81246	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_2]$
16	0,34326 ± 0,00485	0,38179	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$
17	30,03 ± 0,03	1,52668	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_2]$
18	0,34326 ± 0,00485	1,61187	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$

CONCLUSÕES

- Os três ciclones avaliados foram capazes de oferecer um grau de coleta do minério de ferro entre 68 e 83%, fatores bastante razoáveis, principalmente levando-se em consideração a significativa fração de partículas sub-micrômicas presente na amostra;
- O aumento da velocidade de alimentação do ar intensificou a separação do minério de ferro da fase gasosa, porém, verificou-se uma tendência de estabilização dos resultados na mudança de 20 para 30 m/s;
- A variação da vazão de alimentação de sólidos, na faixa de operação utilizada no

escopo deste trabalho, não ofereceu mudanças consideráveis no fator de separação dos ciclones;

- Dos três ciclones avaliados, os resultados experimentais indicaram que o ciclone de máxima eficiência na coleta do minério de ferro foi o ciclone C₁.

Nomenclatura			
D' – [m]	Parâmetro do ajuste RRB ($D' = D_{63,2}$)	v_{t,max} – [m/s]	Velocidade tangencial máxima do gás no interior do ciclone
n – []	Parâmetro do ajuste RRB	v_{ts,m} – [m/s]	Velocidade terminal da partícula com 50% de eficiência
X – []	Fração acumulativa de material passante	η – []	Eficiência global de coleta
D_i – [m]	Diâmetro da partícula i	u_c – [m/s]	Velocidade do gás na seção cilíndrica dos ciclones
ρ_f – [kg/m ³]	Massa específica do fluido (ar)	β – []	Parâmetro do modelo de <i>Massarani</i> para ciclones <i>Stairmand</i>
ρ_s – [kg/m ³]	Massa específica do sólido (minério de ferro)	ΔP – [Pa]	Queda de pressão do ciclone.
Q – [m ³ /s]	Vazão volumétrica de ar na alimentação do ciclone	D* – [m]	Diâmetro de corte da separação [$\eta_i(D^*) = 50\%$]
μ – [kg/m.s]	Viscosidade dinâmica do ar.	ΔH – []	Parâmetro adimensional relacionado à geometria do ciclone
v₀ – [m/s]	Velocidade no duto de exaustão gasosa dos ciclones	v_i – [m/s]	Velocidade do gás na seção retangular de entrada dos ciclones.
h^m – [m]	Altura do eixo central dos ciclones	K – []	Parâmetro do modelo de eficiência de <i>Massarani</i>
λ – []	Fator de atrito	T_{Ar} – [°C]	Temperatura do ar na seção de alimentação
δ – [%]	Desvio percentual entre valor experimental e teórico	V_{Ar} – [m/s]	Velocidade do ar na seção de alimentação
α – []	Parâmetro do modelo de eficiência de <i>Barth</i>	η_i – []	Eficiência individual de coleta da partícula i
v_{ts,i} – [m/s]	Velocidade terminal da partícula i	ṁ_s – [g/s]	Vazão mássica de alimentação de sólidos.
C – [g/m ³]	Concentração de sólidos na corrente de tratamento.		

REFERÊNCIAS

- BARTH, W. Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations. *Brennstoff-Wärme-Kraft*, v. 8, n. 1, p. 1–9, 1956.
- BRAR, L. S.; SHARMA, R. P.; ELSAYED, K. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. *Powder Technology*, Elsevier B.V., v. 286, p. 668–677, 2015. ISSN 1873-328X.
- BRAR, L. S.; SHASTRI, R. Numerical investigations of the flow-field inside cyclone separators with different cylinder-to-cone ratios using large-eddy-simulations. *Separation and Purification Technology*, Elsevier B.V., v. 249, 2020.
- CASAL, J; MARTINEZ, B. J. M. A BETTER WAY TO CALCULATE CYCLONE PRESSURE DROP. CHEM. ENG. (N.Y.); ISSN 0009-2460; USA; DA. 1983; VOL. 90; NO 2; PP. 99-100; BIBL. 12 REF.
- COURY, J. R.; JUNIOR, R. P.; HUNG, Y.-T. Cyclones. In: WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. (Ed.). *Air Pollution Control Engineering*. Second edition. New Jersey: Humana Press Inc., 2004. cap. 3, p. 97–151. ISBN 1-58829-161-8.
- GAO, C.; SUN, G.; YANG, J. Effect of the inlet dimensions on the maximum-efficiency cyclone height. *Separation and Purification Technology*, Elsevier B. V., v. 105, p. 15-23, 2012.
- GIMBUN, J.; CHOONG, T.S.Y.; FAKHRU'L -RAZI, A.; CHUAH, T.G. Prediction of the Effect of Dimension, Particle Density, Temperature, and Inlet Velocity on Cyclone Collection Efficiency. *J. Teknol*, 2004.
- HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*. [S.l.]: Springer, 2002. ISBN 3 540-43326-0.
- ITV de Ouro Preto testa equipamento que reduz umidade do minério de ferro (2016). Disponível em <www.vale.com/brasil/PT/a-boutvale/news/Paginas/itv-de-ouro-preto-testa-equipamento-que-reduz-umidade-do-minerio-de-ferro.aspx> Acessado em 21 de julho de 2022. Referenciado como (ITV, 2016).
- MASSARANI, G. Fluidodinâmica em

- Sistemas Particulados, 2ª Edição - E-papers, Rio de Janeiro, 2002.
- MORIN, M.; RAYNAL, L.; KARRI, S. B. R.; COCCO, R. Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations. *Powder Technology*, Elsevier B. V., v. 377, p. 174-185, 2021.
- MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. Determination of the Transportable Moisture Limit of Iron Ore Fines for the Prevention of Liquefaction in Bulk Carriers. *Mar. Struct.* 2015, 40, 193–224.
- SALOMÃO, E. P. Indicadores da indústria mineral brasileira. ABPM, Brasília, 2015.
- WASILEWSKI, M. Analysis of the effects of temperature and the share of solid and gas phases on the processo of separation in a cyclone suspension preheater. *Separation and Purification Technology*, Elsevier B.V., v. 168, p. 114-123, 2016.
- ZHU, Y.; LEE, K.W., 1999. Experimental study on small cyclones operating at high flowrates. *J. Aerosol Sci.* 30, 1303–1315.