



O CONCEITO DE UMIDADE CRÍTICA PARA A AVALIAÇÃO DE EMISSÃO DE POEIRA

ARMANDO A. MACARINGUE¹, ARTHUR R. L. FONTANA², MAYCON M. CASTRO²,
ANDRÉ L. AMARANTE MESQUITA^{2*}, THIAGO C. S. PINTO³, RONALDO M. SANTOS JR⁴

¹Vulcan Moçambique, Lda, Departamento de Gerência Engenharia de Planta e Pátio.

²Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados, FluidPar / NDAE / UFPA

³Instituto Tecnológico Vale (ITV)

⁴Vale S.A., Meio Ambiente

*e-mail: andream@ufpa.br

RESUMO – A água é o supressor natural de poeira. A presença intersticial da água em materiais granulares gera forças de atração entre as partículas, seja pelas forças capilares, formadas pelas pontes de líquidos, seja pela força de adesão, gerada pela água adsorvida pelas partículas. Aumentando a umidade, aumenta-se essas forças, inibindo a emissão de partículas. Assim, o conhecimento de um valor limite de umidade para o qual a emissão apresenta níveis aceitáveis é muito importante. Este limite é conhecido como umidade crítica. O presente trabalho avalia duas metodologias para a estimativa deste valor em ensaios de torre de poeira e em chute em tubo, adequados para operações de manuseio. São apresentados resultados para minérios de ferro e carvão mineral, utilizando-se a medição da emissão de PM10. Conclui-se que a metodologia utilizada pode ser empregada para a definição de umidade crítica em atividades de mineração e transformação mineral.

INTRODUÇÃO

A geração de poeira ao longo da cadeia produtiva da mineração (desde a mina até ao embarque nos navios) é intrínseca ao seu manuseio, gerando assim consequências indesejáveis como a perda de produto, a contaminação do ar e impactos na saúde (Watson *et al.*, 2000).

Os efeitos das partículas no ar sobre a saúde humana, quando inaladas, alertaram e conduziram a “*National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS)” e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), a definir e implementar normas, tanto para a emissão, quanto para o controle do material particulado no ar ambiente. Especial atenção foi dedicada à parte mais fina do particulado, que é aquela que possui uma maior propensão para ser carregado por longas distâncias e maior dano à saúde (Wangchai *et al.*, 2013).

Mesmo com os novos padrões estabelecidos, foi reconhecido que ainda deveriam ser feitas novas pesquisas sobre a influência das partículas em suspensão na saúde da população. No ano de 1998, a pedido da EPA, foi solicitado ao Congresso Americano que providenciasse um estudo independente pelo “*National Research Council* (NRC)” com o objetivo de identificar as prioridades de investigação para definir os padrões para as partículas em suspensão no ar ambiente. Este trabalho evoluiu, gerando também aqui no Brasil, novas demandas como a adequação das legislações de emissões atmosféricas em fontes fixas do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

Para o controle da emissão de poeira de minérios, o método mais utilizado é a adição de água ao material, aumentando a sua umidade, reduzindo as chances que o particulado fino seja arrastado pelo vento e entre em suspensão. No entanto, a adição de umidade deve ser

controlada, uma vez que a quantidade excessiva de água pode reduzir o valor econômico do produto. Além do fator econômico, o controle da umidade do minério a ser transportado em navios é de suma importância para a operacionalidade e segurança do embarque, visando atender as regulamentações internacionais para o limite de umidade permitido. O parâmetro de controle internacional de umidade com a qual o minério pode ser embarcado é o TML (*Transportable Moisture Limit*). Valores de umidade acima do TML podem trazer graves danos, podendo levar o navio até a naufragar (Munro e Mohajerani, 2016) Problemas secundários também podem ocorrer quando a água é aplicada ao minério em grandes quantidades, como os relacionados ao manuseio devido à aderência do material em chutes de transferências, causando entupimentos, e nas paredes dos vagões ferroviários, dificultando a descarga do material (Planner, 2010)

A emissão de poeira é reduzida uma vez que as forças de adesão das partículas são maiores que as forças que produzem movimento (Schulze, 2008). As forças de ligação entre as partículas de um solo úmidas são as forças eletrostáticas, forças de Van der Waals e forças originadas pela presença de águas intersticiais, geradas pela ligação com a água adsorvida pelas partículas (Cornelis *et al.* 2004).

Kawatra (2006) desenvolveu um aparato, denominado torre de poeira, que permitiu medir a efetividade de supressores de poeira em materiais, para faixa de tamanho de partícula de PM10 e PM2,5. O autor conclui em seu estudo que, uma vez que o material esteja suficientemente úmido pelo supressor de poeira, um aumento adicional na molhabilidade não oferece nenhum benefício adicional. Para materiais hidrocópicos, os supressores que evitam a evaporação da umidade são mais eficientes, se comparados aos que os auxiliam na molhabilidade.

Além do trabalho pioneiro de Kawatra (200), muitos estudos sobre a mitigação da geração de poeira foram conduzidos para solos e em túnel de vento. Funk *et al.*, (2008) realizaram um experimento, onde partículas de solo, em umidade variável, eram injetadas pela parte superior do túnel de vento e a

concentração de PM10 na pluma de poeira era então medida. Os experimentos mostram uma tendência a existir uma umidade limite, onde a emissão poderia ser considerada desprezível, cujo valor dependia da natureza do solo. Solos arenosos apresentaram valores de umidade limite muito inferior a solos argilosos. O decaimento da emissão em função da umidade foi modelado por uma exponencial, na faixa de menor umidade e por uma equação linear para maiores valores de umidade.

Em um estudo conduziram experimentos em túnel de vento para avaliar o efeito da umidade na areia de uma praia na China, Han *et al.*, (2009) utilizaram o parâmetro módulo de erosão eólica, definido como a perda de massa do solo por unidade de área e tempo, relacionada à velocidade de atrito limite. A evolução do módulo eólico em função da umidade do solo, parametrizada pela velocidade do vento, representa um valor limite de umidade, acima do qual o módulo de erosão permanece constante, independentemente do valor da velocidade do vento. No entanto, os autores observam que é necessária uma investigação mais aprofundada de outros fatores.

Ainda sobre o estudo da emissão em solos, Munkhtsetseg *et al.*, (2016), utilizando um pequeno túnel de vento portátil usando um contador de partículas para faixa de tamanho de partícula PM10, definiu uma velocidade de atrito limite crítica em função das condições de umidade do solo. A conclusão é que a poeira aumenta com a diminuição da umidade e com o aumento da velocidade de atrito limite. Os autores argumentam que é necessária uma umidade mínima crítica para que as emissões atinjam níveis significativos. Foi sugerido que a umidade crítica seria a razão entre os valores seco e úmido da velocidade de atrito limite, para uma determinada taxa de emissão que cai repentinamente. No entanto, esta definição não é clara o suficiente para aplicações práticas. Foi constatado, para as condições do estudo, que uma velocidade de atrito inferior a 0,69 m/s, correspondendo a uma velocidade do vento de 13 m/s medida a 10 m da superfície, conduz a uma umidade crítica de 2 %.

Em um estudo de revisão sobre o tema, Oro *et al* (2019) mostraram que trabalhos anteriores estavam mais focados na composição

do solo e menos com os efeitos da umidade. Neste estudos, sensores capacitivos mediram a umidade do solo e as emissões de poeira foram medidas pela coleta de particulados em uma placa com cola, posicionada na saída do túnel. Foi obtida uma regressão linear entre a massa de pó retida na placa e a umidade relativa do solo, que, extrapolado para o valor zero da massa do pó, determinava o valor crítico da umidade relativa. Metodologia similar foi utilizada por Gomes e Amarante Mesquita (2013) para a estimativa velocidade crítica de emissão de partícula, para materiais secos.

Recentemente, Nylén e Sheehan (2021) realizaram um pequeno teste contínuo de queda de material (CDT, Continuous Drop Test) em uma caixa com exaustão e filtro de papel para medir a poeira produzida. A redução da poeira para material com 1% de umidade é cerca de 9 vezes a do material seco. Aumentando-se a umidade para 7%, a redução da emissão de poeira é de três ordens de grandeza

Assim, o conceito de limite de umidade para emissão de poeira vem despertando o interesse da comunidade científica ao longo das últimas décadas, pela necessidade da prevenção da emissão de poeira e pelo controle rigoroso da umidade do material durante os processos na cadeia de produção da indústria da mineração. O objetivo do presente trabalho é avaliar duas metodologias para a determinação do valor de umidade crítica, através de experimentos em duas bancadas diferentes, torre de poeira e chute em tubo, utilizando para 4 diferentes materiais. Os resultados indicam que a metodologia proposta é consistente e por ser empregada para a avaliação das condições de emissão de poeira na indústria mineral, e em material granular, de modo mais amplo,

APARATOS EXPERIMENTAIS

Dois aparatos experimentais foram utilizadas para esse estudo, uma torre de poeira e um chute em tubo. A proposta das bancadas são de simular um processo de geração de poeira, em uma condição de manuseio de material granular.

Foram utilizados 4 tipos de materiais, sendo dois pellets feed de minério de ferro, e dois tipos de carvão mineral.

Torre de Poeira

A torre de poeira foi desenvolvida pela Michigan Technological University (MTU) para estudos sobre geração de poeira (Copeland e Kawatra, 2011). A figura 1 apresenta um desenho esquemático da bancada da torre de poeira, em um projeto desenvolvido por Santos Junior *et al.* (2017, 2018), baseado no aparato de Copeland e Kawatra (2011)

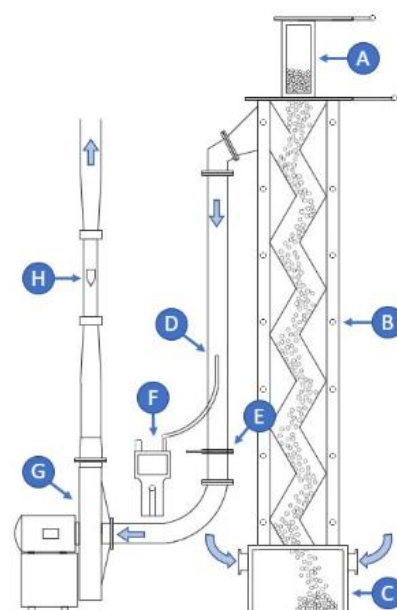


Figura 1: Torre de poeira: A) Caixa de alimentação de material; B) Placas defletoras; C) Caixa receptora de material; D) tubo lateral de sucção; E) Filtro; F) contador de partículas; G) Ventilador; H) Rotâmetro.

O material a ser ensaiado, após ter a sua umidade ajustada, é colocado na caixa de alimentação de material (A), o ventilador (G) então é ligado, ajustando a vazão desejada, com o auxílio do rotâmetro (H). Em seguida, é ligado o contador de partículas (F) para que ele possa iniciar o registro da concentração de particulados presentes no ar para uma faixa de $1\mu\text{m}$ até $20\mu\text{m}$. O material presente na caixa de alimentação (1 kg) é liberado na torre de poeira para que ele possa se chocar com as defletoras (B), as partículas são succionadas pelo tubo lateral (D), passando pelo bocal de captura do contador de partículas. O resultado obtido para cada ensaio é a concentração de particulados no ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e função do tempo, em uma amostragem a cada 1s. A faixa de tamanho de partícula medida é o PM10, que é a fração de

tamanho de partícula respirável (EPA, 2022). A Figura 2 apresenta um exemplo de como são os resultados de um ensaio em triplicata.

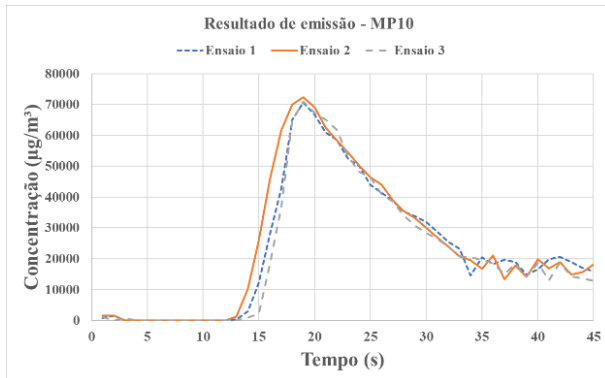


Figura 2: Exemplo de emissão de PM10 em torre de poeira

Chute em Tubo

O chute em tubo é uma bancada que produz resultados similares a torre de poeira, porém, em uma escala menor, utilizando uma quantidade menor de material, tipicamente 200 g, em relação a 1.000 g necessários para a torre de poeira. A banca foi idealizada para se realizar ensaios mais rápidos e com menor quantidade de material, e ainda de baixo custo. A Figura 3 apresenta o aparato experimental. O material é colocado no reservatório b e a válvula de abertura c é acionada, realizando-se o chute do material, através do tubo d, de 100 mm de diâmetro. Este experimento foi idealizado por Macaringue (2019), que realizou testes para o melhor posicionamento do bocal do contador. Essa posição foi de 5 mm da superfície do tubo e 300 mm da base de referência.

O CONCEITO DE UMIDADE CRÍTICA

A umidade crítica é um parâmetro para a determinação de um valor limite de umidade, para o qual a emissão de poeira não é mais significativa e tende a um valor constante. Como analogia, no campo da fluidização de particulados, a velocidade mínima de fluidização permite a determinação de velocidade de fluidização para transportadores fluidizados, tipicamente da ordem de 2 a 3 vezes o seu valor (Gupta *et al.*, 2010).

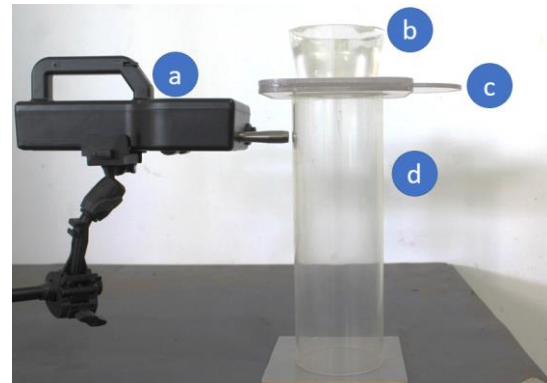


Figura 3: Chute em tubo: a) contador de partículas; b) reservatório de material; c) guilhotina; d) tubo.

A velocidade terminal também é um outro importante parâmetro no escoamento de particulados, permitindo a determinação de valores limites para sedimentação e transporte pneumático (Gidaspow, 1994).

Para a determinação da umidade crítica foram executados experimentos para diversos valores de umidade do material, medindo-se a concentração máxima de partículas emitidas no experimento, seja ele no tubo ou na torre de poeira.

Esse conjunto de valores de concentração em função da umidade são então correlacionados por uma função sigmoide modificada, determinada através dos parâmetros a, b e c, conforme Equação 1

$$f(x) = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{b}\right)^c} \quad (1)$$

onde x é a variável independente (umidade do material).

A umidade crítica foi obtida a partir de duas metodologias. A primeira (U_{cr1}), segue o mesmo princípio adotado por Gontijo *et al.* (2007), em um trabalho realizado para a medição de valores crítico de velocidade de flotação. Calcula-se o ponto de inflexão da curva sigmoide e encontra-se a tangente à curva neste ponto. A intersecção desta reta com a abscissa determina o valor da umidade crítica.

O segundo método (U_{cr2}) de determinação de umidade crítica relaciona a diferença entre os níveis de emissão após o ponto de inflexão. Quando a diferença relativa entre os níveis de emissão de uma certa umidade e a umidade anterior for menor do que 10%, tem-se a determinação da umidade crítica.

A Figura 4 exemplifica o conceito das duas metodologias.

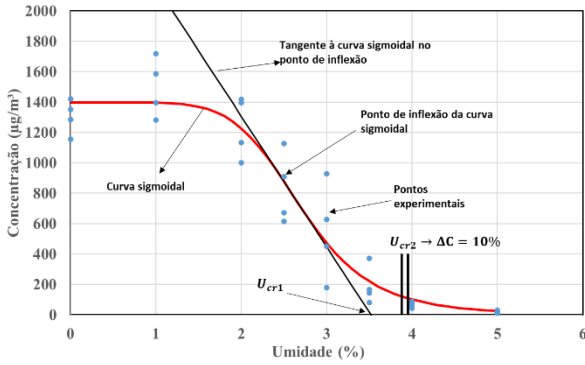


Figura 4: Métodos para a determinação da umidade crítica.

RESULTADOS

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sendo o ajuste da função sigmoide realizado através do método dos mínimos quadrados. As figuras 5 e 6 apresentam a granulometria dos materiais considerados no estudo

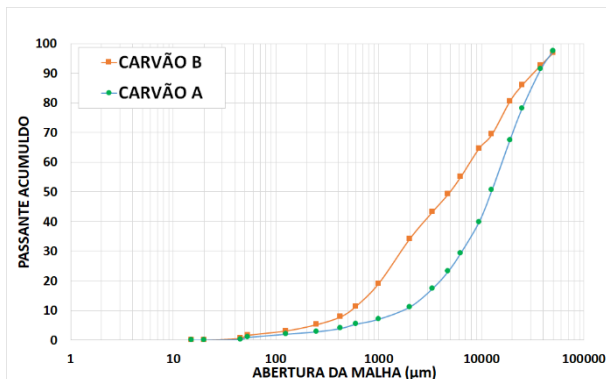


Figura 5: Granulometria do carvão.

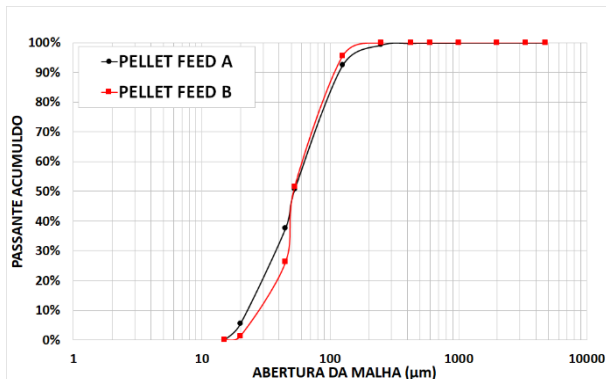


Figura 6: Granulometria do pellet feed.

A Tabela 1 apresenta os valores da densidade das partículas (real) dos materiais considerados no estudo. Verifica-se que os

pellet feed são cerca de 3,3 vezes mais pesado do que os carvões.

Tabela 1. Densidade da partícula para os materiais do estudo.

Material	+150 µm	-150 µm +44 µm	-44 µm +20 µm	-20 µm	Média
Pellet feed A	4,13	4,78	4,77	4,92	4,65
Pellet feed B	4,03	4,81	4,71	4,49	4,51
Carvão B	1,35	1,33	-	1,33	1,34
Carvão A	1,44	1,44	-	-	1,44

Torre de Poeira

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados para os carvões A e B e as Figuras 9 e 10 apresentam os resultados para os pellets feed A e B. A maior umidade crítica encontrada para o ensaio na torre de poeira foi para o carvão B utilizando a primeira metodologia de umidade crítica. A menor umidade crítica foi do pellet feed A. Utilizando a segunda metodologia, o carvão A passa a ter maior umidade crítica e o pellet feed A com o menor valor.

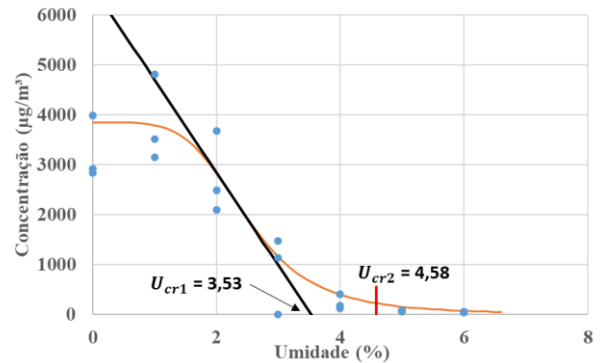


Figura 7: Resultado de umidade crítica em torre de poeira para o carvão A.

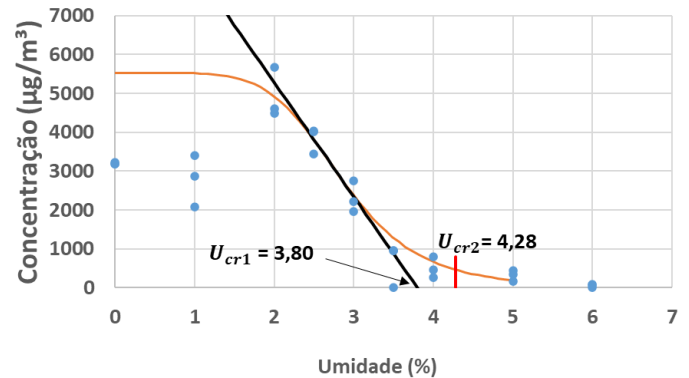


Figura 8: Resultado de umidade crítica em torre de poeira para o carvão B.

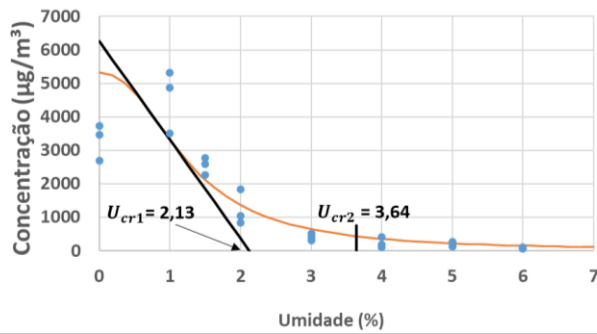


Figura 9: Resultado de umidade crítica em torre de poeira para o pellet feed A

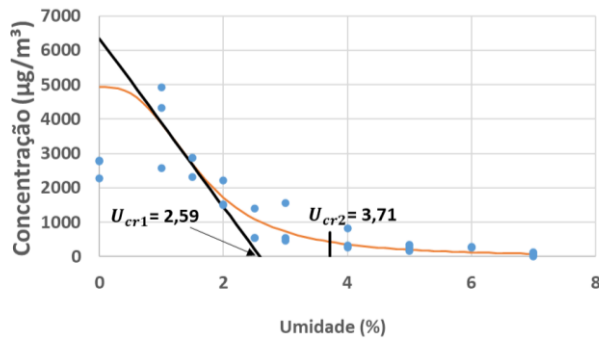


Figura 10: Resultado de umidade Crítica em torre de poeira para o pellet feed B

Chute em Tubo

As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados para os carvões A e B e as Figuras 13 e 14 apresentam os resultados para os pellets feed A e B.

O comportamento dos resultados de umidade crítica para o ensaio de chute em tubo acompanhou a tendência do ensaio em torre, sendo o carvão B e o pellet feed A com o maior e menor valor de umidade crítica para a metodologia 1 respectivamente, o carvão A tendo o maior valor de umidade crítica para a metodologia 2 e o pellet feed B com menor valor.

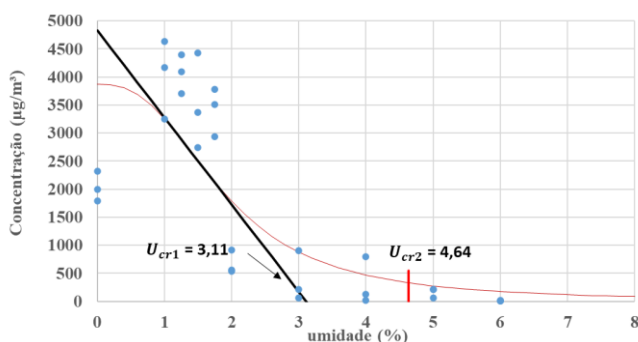


Figura 11: Resultado de umidade crítica em chute em tubo para o carvão A.

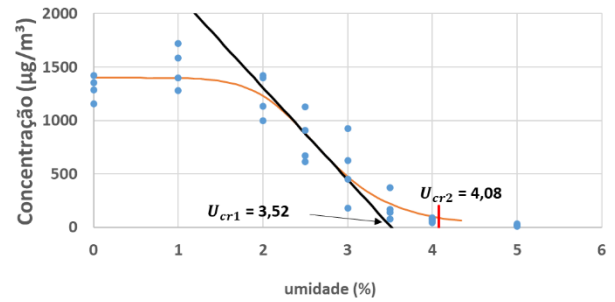


Figura 12: Resultado de umidade crítica em chute em tubo para o carvão B.

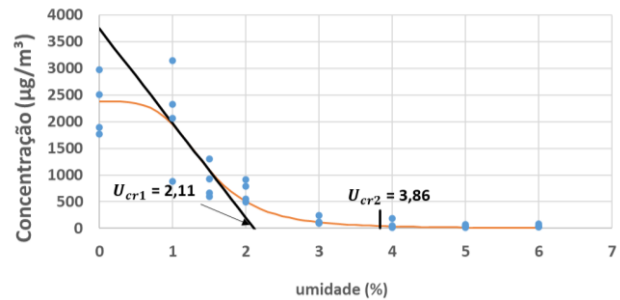


Figura 13: Resultado de umidade crítica em chute em tubo para o pellet feed A

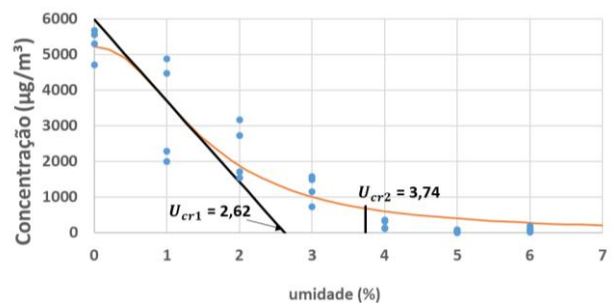


Figura 14: Resultado de umidade Crítica em chute em tubo para o pellet feed B.

A Tabela 2 apresenta um resumo das umidades críticas (U_{cr}) para os ensaios de Chute em tube e em torre de poeira.

Tabela 2. Resumo dos resultados de chute em tubo e em torre de poeira.

Material	Tubo		Torre	
	$U_{cr1}(\%)$	$U_{cr2}(\%)$	$U_{cr1}(\%)$	$U_{cr2}(\%)$
Pellet feed A	2,11	3,84	2,13	3,64
Pellet feed B	2,62	3,74	2,59	3,71
Carvão A	3,11	4,64	3,53	4,58
Carvão B	3,52	4,08	3,80	4,28

A Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros de ajuste a, b e c, para os ensaios da torre de poeira e de chute em tubo, juntamente

com o coeficiente de correlação R^2 de cada modelo de sigmoide.

Tabela 3. Resumo dos parâmetros de ajuste para os ensaios de chute em tubo e torre de poeira.

Material	Ensaio	a	b	c	R^2
Carvão A	Tubo	3872,44	1,89	2,63	0,5245
	Torre	3846,54	2,50	4,62	0,9384
Carvão B	Tubo	1398,54	2,71	6,53	0,9130
	Torre	5524,73	2,86	5,91	0,9742
Pellet feed A	Tubo	2376,53	1,45	4,07	0,8197
	Torre	5320,00	1,25	2,27	0,8867
Pellet feed B	Tubo	5216,86	1,52	2,11	0,8644
	Torre	4930,00	1,60	2,79	0,8834

O ensaio em tubo do carvão A possui pouca significância estatística por conta do espalhamento de pontos entre 0 e 2% de umidade, contudo, a sigmoide ajustou de forma semelhante ao ensaio da torre, para o mesmo material, obtendo umidades críticas semelhantes. Para os outros materiais e experimentos, a função sigmoide possibilitou que o modelo descrevesse mais de 80% dos dados experimentais, sendo o que melhor descreveu o ensaio na torre de poeira para o carvão B (97,42%).

A relação entre a umidade crítica dos ensaios realizados em torre de poeira e em chute em tubo apresentou um comportamento linear para as duas metodologias de umidade crítica, como apresenta a Figura 15.

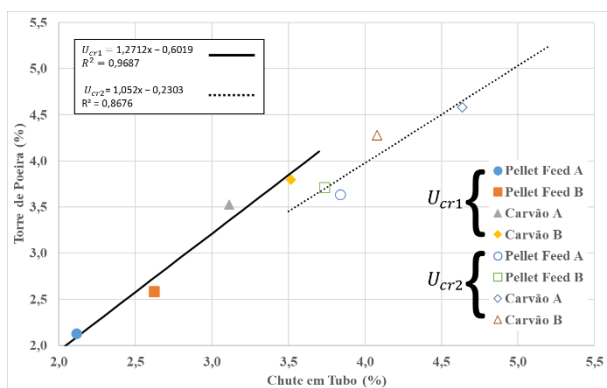


Figura 15: Relação entre a umidade crítica obtida no ensaio da torre de poeira e no ensaio de chute em tubo para todos os materiais.

Ambas as metodologias apresentaram uma correlação linear entre os ensaios em torre de poeira e os ensaio de chute em tubo. Esse

resultado evidencia a relevância do ensaio de chute em tubo, pois trata-se de um aparato simples e de custo muito inferior ao da torre de poeira.

A umidade crítica pela primeira metodologia, em geral, apresentou valores menores do que a segunda metodologia. A umidade crítica na primeira, se encontrando em uma zona de transição, de uma região de forte decréscimo da emissão para uma região de atenuação mais suave. Já para a segunda metodologia, a umidade crítica está em uma região da sigmoide em que a diminuição da emissão é mais suave e tende de maneira assintótica para um valor de emissão nula. O valor de umidade crítica na segunda metodologia é cerca de 1 a 2% do valor encontrado pela metodologia.

Desses resultados pode-se sugerir que essas metodologias podem se constituir uma única. O valor encontrado pela tangente no ponto de inflexão pode-se denominar como umidade limite inferior e o valor encontrado pelo decréscimo relativo da emissões na segunda parte da sigmoide, com o valor de umidade crítica.

Em relação aos valores encontrados para a umidade crítica, verifica-se que não há praticamente variação entre os pellets feed e que para o carvão há um pequeno acréscimo de valor do carvão A para o B. Pode-se explicar esses comportamento em função da distribuição granulométrica. Os pellet feeds têm praticamente a distribuição e o carvão A tem um pouco mais de fração ultrafina do que o B, mesmo que isso não seja tão evidente. É necessário se ter um maior detalhamento da fração ultrafina, que só impossível em granulômetros a laser.

Em relação aos valores de umidade crítica entre o pellet feed e o carvão, sugere-se que o menor valor para o pellet feed, deve-se ao maior valor de densidade da partícula, cerca de 3,3 vezes maior. Mais pesada a partícula maior dificuldade de ser arrancada do meio, ou seja, gera menos poeira, para configurações semelhantes.

Assim, verifica-se que a umidade crítica tem seu valor dependente da fração ultrafina e da densidade real dos materiais. Maior investigação se faz necessária se ter um conhecimento mais consolidado sobre as

variáveis de influência na determinação do valor de umidade crítica de material granular.

CONCLUSÃO

A umidade crítica é um importante parâmetro que determina a umidificação necessária para que a emissão de poeira assuma valões aceitáveis para os processos de manuseio de material granular. Esse valor possibilita que se possa ter um controle consciente de uso de água na umectação de material com objetivo de supressão de poeira.

Foi desenvolvido um simples aparato experimental para a avaliação da emissão de poeira, denominado de ensaios de chute em tubo. Os resultados de determinação de umidade crítica dos experimentos em torre de poeira e de chute em tubo apresentaram uma correlação linear. Esse resultado tem influência da modelagem da física do problema pela função sigmoide, que permite a obtenção de resultados para a umidade crítica, mesmo em com grande espalhamento dos dados e com baixo nível de correlação estatística, como em algum casos dos ensaios de chute em tubo. O baixo custo do equipamento e a o uso de pouco material são grades vantagens desse equipamento

Entretanto, quando da disponibilidade de uma torre de poeira e de quantidade suficiente de amostras, recomenda-se os ensaios nesse aparato para a determinação de umidade crítica. Os experimentos em torre de poeira apresentam uma maior significância estatística dos resultados, se adequando melhor às funções sigmoides, com um nível maior do coeficiente de correlação R^2 .

A análise das duas metodologias apresentadas, se consolidaram em uma única. O valor de umidade determinado pela tangente no ponto de inflexão é denominada umidade limite inferior, e o valor determinada pela variação relativa durante o decaimento da função sigmoide, é denominado umidade crítica. A umidade limite inferior determina o início da avaliação para a determinação da umidade crítica. Entretanto, o valor de 10% como critério da determinação do valor pode ser menor, sendo necessária maiores investigações.

A compreensão e explicação dos fenômenos físico-químicos envolvidos, da interação da umidade com as partículas, o efeito da fração ultrafina e da densidade de partículas, merecem maiores investigações.

O conceito de umidade crítica apresentado neste trabalho é de fundamental importância para a determinação da umidade final de produtos para operações de manuseio de material granular na indústria.

NOMENCLATURA

Nomenclatura	Descrição	Unidade
U_{cr}	Umidade crítica	(%)
PM10	Material particulado com diâmetro de $10\mu\text{m}$	μm
R^2	Coefficiente de correlação	-

REFERÊNCIAS

- COPELAND, C. R. E KAWATRA, S. K. (2011). Design of a dust tower for suppression of airborne particulates for iron making. *Minerals Engineering*, vol. 24, 1459–1466
- CORNELIS, W.M., GABRIELS, D., ROGER HARTMANN, R. (2004), A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 68, p.1154–1161.
- DE F. GONTIJO, Carlos; FORNASIERO, Daniel; RALSTON, John. The limits of fine and coarse particle flotation. *The Canadian journal of chemical engineering*, v. 85, n. 5, p. 739-747, 2007.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (2022). <https://www.epa.gov/>. Acessado em 15/08/2016. Pesquisa por PM10 e PM2.5.
- FUNK, R., REUTER, H.I., HOFFMANN, C., ENGEL, W., ÖTTL, D. (2008), Effect of

- moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. Fine dust emission from tillage operations. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 33, p.1851-1863.
- GIDASPOW, D., Multiphase flow, and fluidization. Academic Press, San Diego, 1994.
- GOMES, L.M., AMARANTE MESQUITA, A.L. (2013). Effect of Particle Size and Sphericity on the Pickup Velocity in Horizontal Pneumatic Conveying. *Chemical Engineering Science*, vol. 104, p.780-789.
- GUPTA, C.K., AGRAWAL, V.K., MILLS, D., A model for fluidized motion conveyor transporting fly ash, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.34, p.1042–1048, 2010.
- HAN, Q., QU, J., ZHANG, K., ZU, R., NIU, Q., LIAO, K. (2009), Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China. *Geomorphology* Vol. 104, p.230–237
- KAWATRA, S. (2006). Dust in mineral processing. In *Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology*, p.51-56, Chennai, India.
- MACARINGUE, A.A. (2019), Determinação da humidade crítica para emissão de poeira de minérios de ferro e carvão. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas e Processamento Mineral. ITV.
- MUNKHTSETSEG, E., SHINODA, M., GILLIES, J.A., KIMURA, R., KING, J., Nikolich, G. (2016), Relationships between soil moisture and dust emissions in a bare sandy soil of Mongolia. *Particuology* Vol. 28, p.131-137.
- MUNRO, M.C., MOHAJERANI, A. (2016). Liquefaction incidents of mineral cargoes on board bulk carriers, *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2016. p.1–20.
- NYLEN, J., SHEEHAN, M. (2021), The impact of moisture on lead concentrate powder dust emissions in ship-loading operations. *Powder Technology*, Vol. 394, p.353-362.
- ORO, L.A., COLAZO, J.C., AVECILLA, F., BUSCHIAZZO, D.E., Asensio, C. (2019), Relative soil water content as a factor for wind erodibility in soils with different texture and aggregation. *Aeolian Research*, Vol. 37, p.25-31.
- PLANNER, J. (2010). A sustainable approach to manage dust emission during handling and transport of coal and iron ore. Introspec Consulting, Epping, NSW, 2121, Australia.
- SANTOS JUNIOR, R.M., RAMALHO, R.V.C.; FEITOZA, F.A., AMARANTE MESQUITA, A.L., GONTIJO, C.F., LEAL FILHO, L.S. (2017). Bancada para caracterização de emissão de poeira de minérios e teste de técnicas de supressão de poeira. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, ENTMME 2017, Belém - PA, Brasil. 22 a 25 de outubro, 2017.
- SANTOS JUNIOR, R.M., RAMALHO, R.V.C., SILVA, A.J.C., AMARANTE MESQUITA, A.L., GONTIJO, C.F. (2018). Bancada para estudo da emissão de poeira em condições dinâmicas. 19º Simpósio de Mineração, ABM Week 2018, São Paulo - SP, Brasil, 02 a 04 de outubro de 2018
- SCHULZE, D. (2008), *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer.
- WANGCHAI, S., HASTIE, D. B., WYPYCH, P. W. (2013). The simulation of particle flow mechanisms in dustiness testers. 11th International Congress on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation. The University of Newcastle.
- WATSON et al. 2000. Fugitive dust emissions, in: Davis, W.T. (Ed.), *Air Pollution Engineering Manual*, Second Edition, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 117-135. Based on formulae of Hinds (1999) *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Ed., 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.