



AVALIAÇÃO DO CONCEITO DE UMIDADE CRÍTICA ATRAVÉS DE ENSAIOS EM TORRE DE POEIRA

MAYCON M. CASTRO^{1*}, ARTHUR R. L. FONTANA¹, ANDRÉ L. AMARANTE MESQUITA¹, MAURÍCIO C. SEGATO², RODRIGO FINA FERREIRA², BENITO B. SILVA³.

¹Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados, FluidPar / NDAE / UFPA

²Gerência de Validação de Rotas e Tecnologias de Processamento do Minério de Ferro, Vale S.A.

³Gerência de Desenvolvimento de Processo Mineral, Vale S.A.

*e-mail: maycon.castro@tucurui.ufpa.br

RESUMO - A poluição ambiental é um aspecto muito importante para a indústria, podendo causar paralisações de operações por ações judiciais, e, o mais grave, impactar seriamente na saúde das pessoas. Assim, a mitigação da geração de poeira, através de agentes supressores, se reveste de grande importância. O supressor natural é a água. A umidade nos materiais granulares diminui a emissão de poeira. 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. Uma das formas de avaliar a umidade crítica é através de ensaios em torre de poeira. O presente trabalho apresenta um estudo em torre de poeira sobre a umidade crítica para vários materiais em diferentes granulometrias. É concluído que a granulometria é um fator fundamental para a umidade crítica e que encontrou uma relação linear entre este valor e a quantidade de passante na abertura de 10 μm .

INTRODUÇÃO

Os trabalhadores das indústrias de mineração e construção, como também a região populacional próxima a essas indústrias, correm maior risco de doenças respiratórias em decorrência da exposição a níveis nocivos de material particulado (MP) no ar por longos períodos de tempo. Partículas suspensas com um diâmetro aerodinâmico de 10 μm (MP10) e 2,5 μm (MP2,5) são consideradas biologicamente ativas devido à sua capacidade de adentrar o trato respiratório superior e penetrar profundamente no parênquima pulmonar, causando danos potencialmente irreversíveis, prejudicando a respiração e reduzindo a qualidade de vida (Vanka *et al.*, 2022).

Um dos fatores importantes no controle da emissão de MP durante o manuseio de minério é a umidade, uma vez que baixos

valores de umidade contribuem para o aumento da geração de poeira, enquanto que o excesso de umidade, apesar de minimizar a geração de poeira, causa prejuízos ao longo da cadeia de produção como: aumento do volume do material, maior frequência nas manutenções de equipamentos, entupimento de chutes de transferência e entre outros problemas (Chen *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022).

Para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos relacionados a umidificação, deve-se entender as forças de ligação entre partículas: as forças eletrostáticas, forças de Van der Waals e forças originadas pela presença da água intersticial gerando pontes de líquido entre as partículas que são as forças capilares, e as forças de adesão, geradas pela ligação com a água adsorvida pelas partículas (Cornelis *et al.*, 2004). A intensidade da força de Van der Waals é diretamente ligada ao tamanho da partícula, da distância entre

partículas e da característica da superfície do material (Schulze, 2008).

A emissão de poeira de materiais granulares é avaliada experimentalmente, utilizando-se, túnel de vento e de chutes de material, como a torre de poeira. Para o primeiro, são muitos estudos encontrados na literatura, em especial para emissão de solos (Chang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021) Já para o segundo aparato, torre de poeira, poucos trabalhos são encontrados na literatura, desde o trabalho pioneiro de Copeland e Kawatra (2011).

Através desses tipos de estudos experimentais, pode-se avaliar um parâmetro muito importante na área da emissão de poeira: a umidade crítica, que o valor limite de umidade do meio granular, acima do qual a emissão de poeira não é significativa. Embora importante, há variações de definições e de nomenclatura para este parâmetro na literatura.

Em um estudo sobre a emissão de poeira em solos, Funk *et al.*, (2008) realizaram um experimento, onde partículas de solo, em umidade variável, eram injetadas pela parte superior de um túnel de vento, e a concentração de PM10, na pluma de poeira, era então medida. Os resultados apresentam uma tendência a se ter uma umidade limite, onde a emissão pode ser considerada desprezível, cujo valor dependia das características do solo. O decaimento da emissão, em função das umidades, foi modelado por uma exponencial, na faixa de menor umidade e por uma equação linear para a faixa de maiores valores de umidade.

Utilizando esta mesma metodologia, Aimar *et al.*, (2011) encontrou resultados similares ao de Funk *et al.* (2008), onde a umidade influencia na emissão de partículas, para diferentes tipos de solos. Foi encontrado que as emissões diminuem linearmente com o aumento da umidade. Segundo Aimar *et al.* (2011), umidade crítica é o valor de umidade na qual a emissão começa a diminuir, e umidade limite é o valor de umidade, onde acima dela a emissão de partículas é insignificante.

Outro parâmetro utilizado para a avaliação da emissão de poeira é o módulo de erosão eólica, definido como a perda de massa do solo por unidade de área e tempo. Han *et al.*, (2009) utilizaram este parâmetro com um

experimento em túnel de vento, avaliando a influência da umidade na areia de uma praia na China. A evolução do módulo de erosão eólica em função da umidade do solo, parametrizado pela velocidade do vento, determina uma umidade crítica, que para valores acima deste limite, o módulo de erosão eólica permanece constante, independentemente do valor de velocidade do vento.

Também em um estudo de emissão do solo, Munkhtsetseg *et al.*, (2016) realizaram um estudo experimental em um pequeno túnel de vento portátil, usando um contador de partículas para medir a concentração de PM10, visando definir uma velocidade de atrito limite crítica em função das condições de umidade de solo. Foi concluído que a poeira aumenta com a diminuição da umidade e com aumento da velocidade de atrito limite do escoamento. Os autores sugerem haver uma umidade mínima crítica para que a emissão tenha um nível significativo. É proposto que a umidade crítica seria quando a relação entre os valores seco e úmido da velocidade de atrito limite, para uma dada taxa de emissão, tenha uma diminuição abrupta. Porém, essa definição não é suficientemente clara para aplicações práticas.

Oro *et al.*, (2019), em experimento em túnel de vento, adotaram uma técnica diferente, tanto para medir a emissão de poeira de solos, quanto para definir a umidade crítica. A medição foi realizada pela coleta de pó em placas adesivas na saída do túnel. Uma regressão linear foi obtida entre a massa de pó retida nas placas e a umidade do solo. E extrapolação para o valor nulo de massa de pó, determina o valor de umidade crítica.

Sem abordar o conceito de umidade crítica, porém avaliando a emissão de poeira em função da umidade do material, Nylen e Sheehan (2021) conduziram um experimento de um pequeno chute contínuo de material (CDT, *Continuous Drop Test*), utilizando filtros de papel para a medição da poeira gerada. A diminuição de poeira a 1 % de umidade é de cerca de 9 vezes em relação ao material seco, e a 7% de umidade, de três ordens de grandeza, sendo somente observável em escala logarítmica. Os autores sugerem que o aumento de umidade, aumenta a quantidade de líquido no interstício entre as partículas, intensificando

a força capilar de coesão entre as partículas, diminuindo a geração de poeira.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma metodologia de determinação da umidade crítica, e avaliar como as características dos materiais granulares, principalmente a granulometria, influenciam no cálculo de seu valor. O estudo é conduzido em uma torre de poeira, que, de acordo com Macaringue (2019), produz resultados similares aos conduzidos em túnel de vento. O estudo conclui por uma forte correlação linear entre a umidade crítica e fração passante em 10 μm .

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados na torre de poeira desenvolvida pelo Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Foram realizados ensaios de caracterização para todos os materiais, obtendo os valores de massa específica real (ensaio de picnometria), massa específica aparente, distribuição granulométrica, sendo em peneiramento a seco para faixa de tamanho de partícula até 100 μm e granulometria a laser para particulados menores que 100 μm . Estes ensaios em Granulômetro laser foram realizados pela Vale e os ensaios em microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram realizados pelo laboratório do ISI Mineração.

Materiais

Os materiais utilizados nos ensaios são 7 coprodutos da cadeia de produção do minério de ferro, possuindo características variadas de granulometria, composição química, massa específica real, massa específica aparente e entre outros.

Metodologia para umidificação

O ajuste de umidade dos materiais para os ensaios foi realizado através da adição de água em massa de material seco. Um misturador planetário foi utilizado para garantir a homogeneidade da umidade no material. Para cada amostra de material ensaiada, três pequenas amostras testemunhas eram conduzidas para medição da umidade real, em estufa.

Metodologia de ensaio em Torre de Poeira

A bancada utilizada para estudo da geração e avaliação da poeira em condições dinâmicas, é apresentada na Figura 1. Este aparato foi desenvolvido com base na torre de poeira desenvolvida pela *Michigan Technological University* - MTU (Copeland e Kawatra, 2011). O material a ser ensaiado, já umidificado, é colocado no reservatório de alimentação (A), equipado com uma válvula guilhotina. O material é descarregado no corpo central da torre (B), equipada com defletores para promover a geração de poeira. Em sentido oposto à queda do material, um fluxo de ar é gerado por um exaustor (G) que arrasta a poeira para o tubo de coleta e medição (D), equipado de um contador de partículas (F) e uma seção de filtro de coleta de pó (E). Um rotâmetro (H) verifica a vazão de ensaios, que é ajustada por um inversor de frequência de acionamento do exaustor.

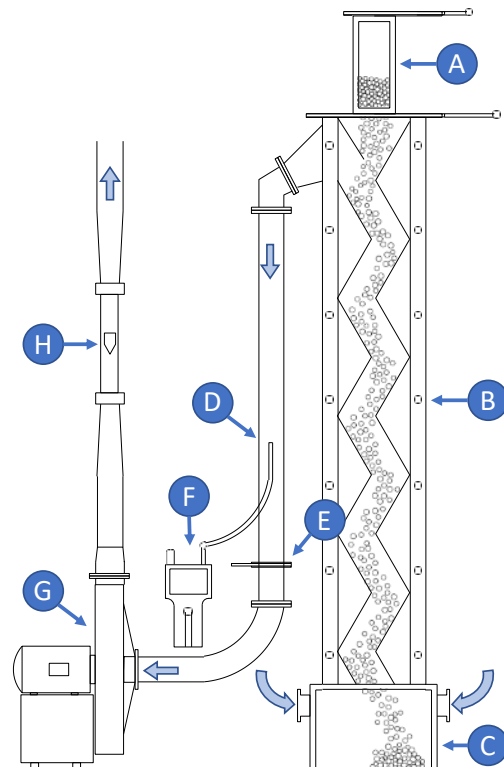


Figura 1: Torre de poeira e seus componentes.

Os ensaios foram realizados em triplicata, utilizando 1 kg de material por ensaio. O contador de partículas possui faixa de leitura de emissão para material particulado com diâmetro de 1 μm até 20 μm , além de contabilizar todos os particulados totais em

suspensão (PTS) para partículas com diâmetro de até 50µm. Para auxiliar na percepção da emissão de poeira, um filtro foi instalado após o bocal isocinético de captura do contador de partículas, onde após cada triplicata, foi possível observar essa emissão visualmente pela poeira retida no filtro.

Os níveis de emissão medidos foram considerados com base na concentração de partículas que foram aspiradas pelo tubo lateral por volume de ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), medidos pelo contador de partículas para a faixa de PM10, a fração respirável da poeira (CONAMA, 2022). A emissão considerada é o valor do pico médio dos três ensaios de distribuição de PM10.

Os resultados de distribuição de concentração são superpostos, coincidindo os valores de pico de cada ensaio, para um tempo referencial zero, como mostra a Figura 2. Os ensaios apresentaram uma boa repetibilidade, permitindo a obtenção de um valor confiável.

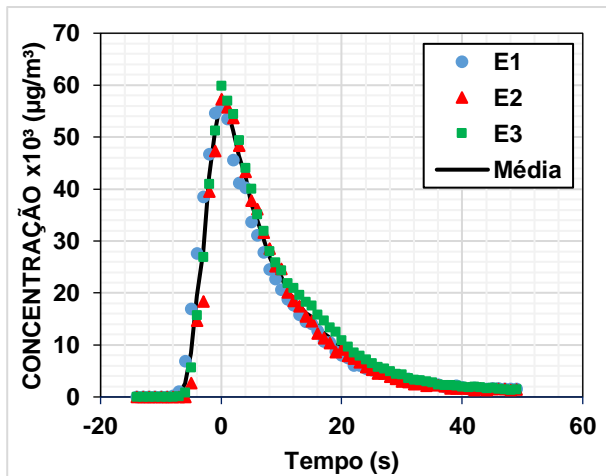


Figura 2: Determinação da concentração de pico de emissão de PM10.

Determinação da Umidade Crítica

Define-se umidade crítica o valor limite de umidade do material para que a emissão, em valores de umidade superiores ao limite, não seja significativa. A Figura 3 mostra a comparação entre a metodologia (Ucrítica¹) desenvolvida por Macaringue (2019) e a metodologia (Ucrítica²) utilizada neste estudo.

Em ambos os estudos a emissão de poeira foi ajustada pela metodologia original apresentada por Macaringue (2019), que considera uma função de ajuste do tipo sigmoide, definida (Equação 1) definida pelos

parâmetros a , b e c , e u sendo a variável independente umidade.

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

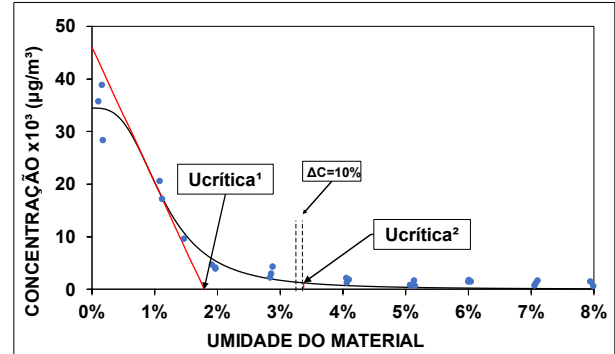


Figura 3: Representação gráfica de ensaios em gráfico de função sigmoide para a umidade crítica.

Esse tipo de função é largamente utilizado para a descrição de fenômenos físicos (Florentino *et al.*, 2010), porém foi a primeira vez, a conhecimento dos autores, que foi usada para descrever a emissão de poeira.

Na metodologia de Macaringue (2019), a umidade crítica é definida pela intersecção da tangente à sigmoide no ponto de inflexão da curva. No presente trabalho a umidade crítica é determinada quando a variação entre dois pontos consecutivos da sigmoide é menor do que 10%, em passos discretos do valor de umidade. O passo de umidade para esta avaliação da sigmoide foi de 0,1.

Os experimentos foram realizados em triplicata para cada umidade, com o aumento crescente de umidade em intervalos de 1%. A Figura 4a mostra um exemplo típico de ensaio de umidade crítica. A Figura 4b a distribuição da emissão PM10 para três valores de umidade e a Figura 4c as vistas do filtro na tubulação, correspondentes a esses pontos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta os resultados de passante acumulado para os materiais utilizados neste trabalho, apresentando o D50 (diâmetro médio de partícula) desses materiais e a massa específica real na Tabela 1. A Figura 6 apresenta os resultados de massa específica

aparente pela umidade do material para todos os produtos. Os valores dos parâmetros para ajuste das sigmóides e a variação explicada (R^2) para cada produto são apresentados na Tabela 2.

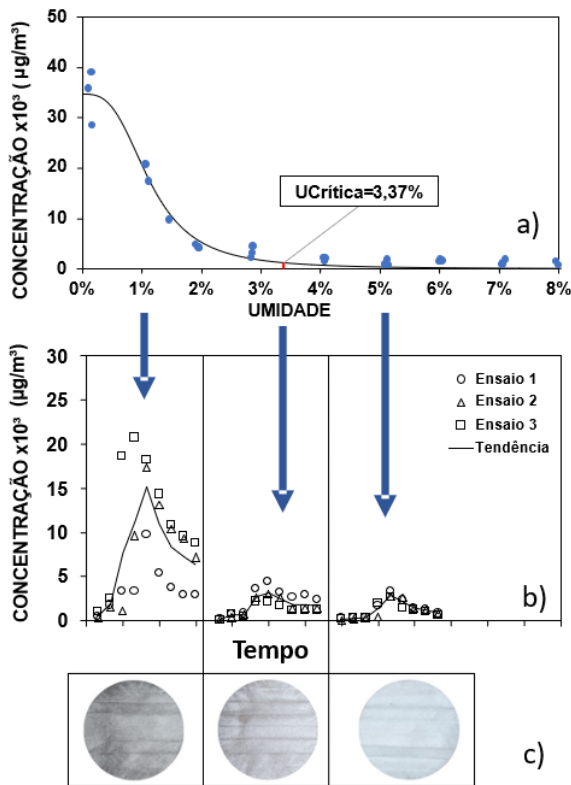


Figura 4: a) Exemplo de ensaios de umidade crítica. b) Distribuição de emissões de concentração de PM10. c) Imagens do filtro.

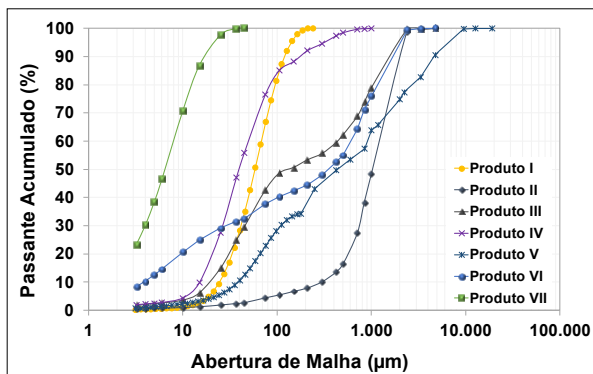


Figura 5: Granulometria dos materiais utilizados nos ensaios.

Para todos os produtos foi possível realizar um ajuste dos dados obtidos nos experimentos, mostrando que a função sigmoide conseguiu se ajustar para todos os produtos analisados. A Figura 7 apresenta a curva sigmoide e a Ucrítica encontrada para os 7 (sete) produtos avaliados, levando em consideração a concentração de

particulados emitidos para o tamanho de partícula PM10.

Verifica-se que o Produto I possui o menor valor de Ucrítica em comparação com os demais produtos. O maior valor de umidade crítica foi encontrado para o Produto VII. É esperado que a distribuição granulométrica dos materiais esteja relacionada a umidade crítica. Porém, especificamente, o parâmetro d_{50} , não está diretamente correlacionado com a Ucrítica. Como mostra a Figura 8.

Tabela 1: Diâmetro médio de partícula e massa específica real dos materiais ensaiados.

Produto	Diâmetro Médio - d_{50} (μm)	Massa Específica Real (g/cm^3)
I	71,32	4,68
II	1045,37	4,21
III	133,03	3,45
IV	39,64	3,83
V	438,12	3,99
VI	352,8	3,87
VII	6,57	3,73

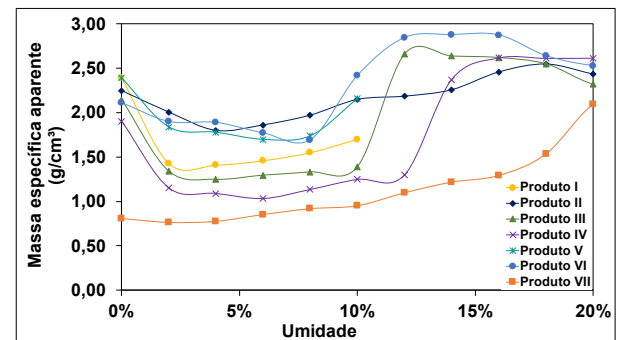


Figura 6: Massa específica aparente dos materiais.

Tabela 2: Parâmetros da sigmoide para cada produto.

Produto	a	b	c	R^2
I	5,17E+04	2,58E-03	1,49	98,91%
II	6,06E+04	8,06E-03	3,03	98,83%
III	7,13E+04	9,62E-03	2,45	97,67%
IV	3,45E+04	1,13E-02	3,02	97,13%
V	6,64E+04	7,28E-03	2,77	99,51%
VI	6,91E+04	4,33E-02	7,03	90,64%
VII	8,85E+04	9,67E-02	6,44	94,71%

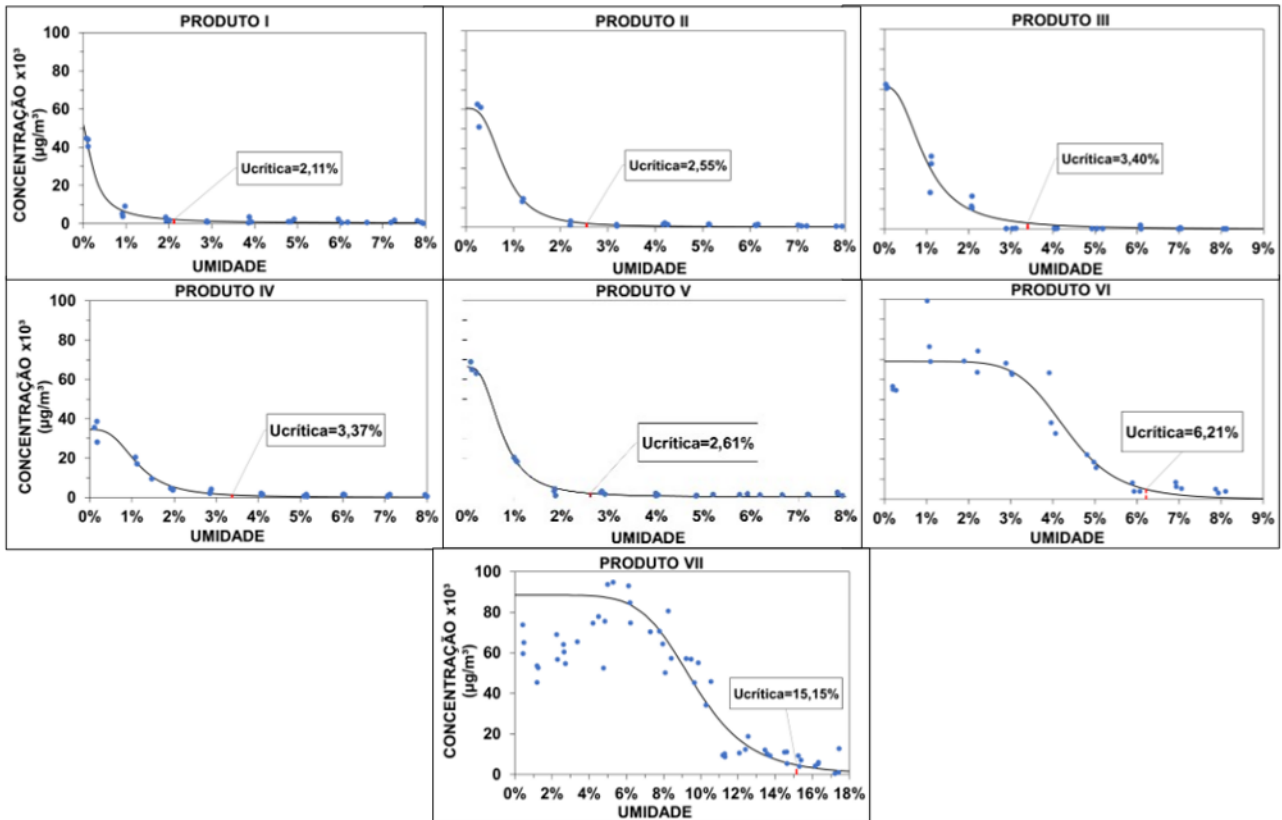


Figura 7: Curvas sigmóides e umidade crítica dos 7 produtos ensaiados.

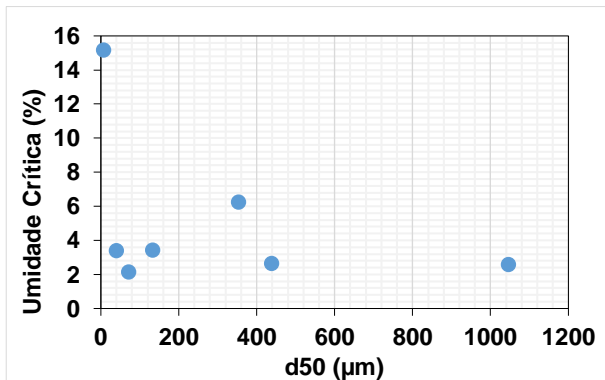


Figura 8: Correlação em $U_{critica}$ e d_{50} .

Na Figura 9 é mostrado a micrografia, obtida pelo MEV, para o Produto I (Figura 9a) e para o Produto VII (Figura 9b). Observa-se que na Figura 9a o Produto I, o qual obteve a menor umidade crítica (2,11%) possui uma menor quantidade de finos ($<10\mu\text{m}$), diferente do Produto VII ($U_{critica}=15,15\%$) mostrado na Figura 9b, onde possui uma quantidade maior de finos. As imagens sugerem que a maior a quantidade de finos oferece uma maior resistência à penetração da umidade no meio granular. Evidenciando que a fração ultrafina deve estar relacionada com a umidade crítica do material.

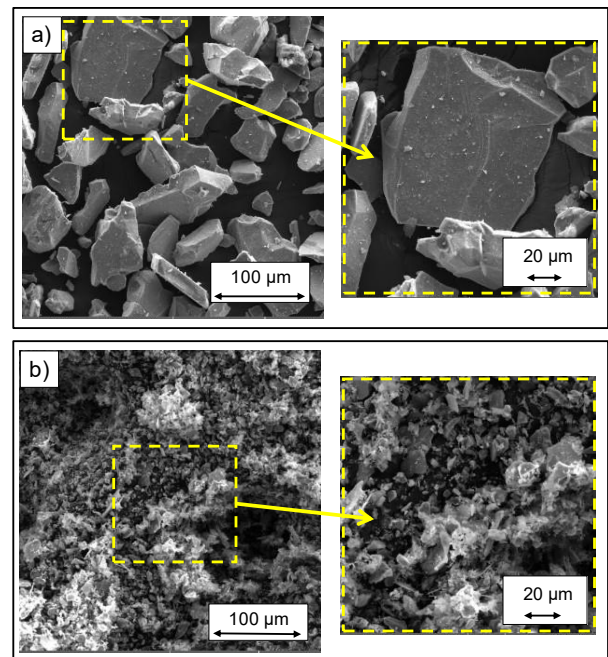


Figura 9: Micrografia: a) do Produto I 842x (esquerda) 4550x (direita), b) do Produto VII 811x (esquerda) 5440x (direita).

A Figura 10, que mostra a variação da umidade crítica em função do percentual passante em $10\mu\text{m}$, confirma uma relação fortemente linear entre esses dois parâmetros.

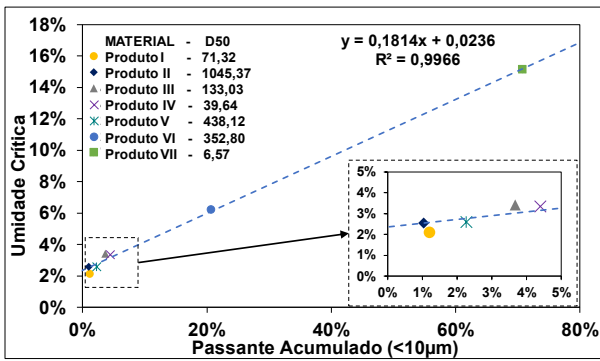


Figura 10: Relação entre umidade crítica e o passante acumulado (<10µm).

Esta relação é similar ao resultado encontrado por Funk *et al.* (2008), onde a emissão de particulados PM10 e a fração passante abaixo de 6,3µm possui um comportamento linear.

CONCLUSÃO

Apresentou-se uma nova metodologia para a determinação da umidade crítica, utilizando uma função sigmoide para representar a variação da emissão de poeira em função da umidade do material. O valor é determinado quando a variação do decaimento de emissão de poeira é menor do que 10%.

Foi realizado um estudo sobre o comportamento da umidade crítica em sete coprodutos do processo de obtenção dos minérios ferro, do tipo *sínter* e *pellet feed*. O estudo foi conduzido em uma torre de poeira.

Os produtos que possuem percentual de finos de finos abaixo de 5% (I, II, III, IV e V) obtiveram valores de umidade crítica entre 2% e 4%. O Produto VI, que possui quantidade de finos acima de 20%, teve um aumento na sua umidade crítica (6,21%), já o Produto VII que é o material com maior porcentagem de finos, acima de 70%, teve o maior valor de umidade crítica entre todos os materiais (15,15%), mostrando a influência direta percentual de finos.

Os resultados demonstraram que a umidade crítica está fortemente correlacionada com o percentual de finos passante acumulado abaixo de partículas de 10µm de diâmetro. Resultado prévio da literatura mostra tendências similares, com o de Funk *et al.* (2008), onde apresenta uma relação linear da emissão em relação ao passante de 6,3 µm, e de

Aimar *et al.* (2102), para a relação entre a umidade crítica e passante em 2 µm. Embora os resultados literatura apresentem coeficientes de correlação muito menores do que o encontrado no presente trabalho.

Esta correlação fortemente linear para coprodutos de beneficiamento de minério de ferro ainda não tinha sido publicada na literatura, e representa uma importante informação para os processos de contenção da geração de poeira mineral, utilizando a água como supressor de poeira.

NOMENCLATURA

CDT - *Continuous Drop Test*

d50 - Diâmetro médio de partícula, passante em 50%

f(x) - função sigmoide

ISI - Instituto Senai de Inovação

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

PM - Material Particulado

PTS - Particulados Totais em Suspensão

Ucrítica¹ - Umidade crítica metodologia 1

Ucrítica² - Umidade crítica metodologia 2

REFERÊNCIAS

- AIMAR, S. B., MENDEZ, M. J., FUNK, R., BUSCHIAZZO, D. E. (2012). Soil properties related to potential particulate matter emissions (PM10) of sandy soils. *Aeolian Research*, Vol. 3, n. 4, p.437-443.
- CHANG, P., CHEN, Y., XU, G., HUANG, J., GHOSH, A., LIU, W.V. (2019). Numerical study of coal dust behaviours and experimental investigation on coal dust suppression efficiency of surfactant solution by using wind tunnel tests. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, doi: 10.1080/15567036.2019.1639855
- CHEN, J., WILLIAMS, K., CHEN, W., SHEN, J., YE, F. (2020). A Review of Moisture Migration in Bulk Material. *Particulate Science and Technology*, Vol. 38, n. 2, p.247-260.
- CONAMA (2022), Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990. <http://www.mma.gov.br/port/conama/leg>

- iabre.cfm?codlegi=100. Acessado em 12/08/2022.
- COPELAND, C. R., KAWATRA, S. K. (2011), Design of a dust tower for suppression of airborne particulates for iron making. *Minerals Engineering* Vol. 24. p.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.
- FLORENTINO, H. O. (2010), Funções Sigmoidais Aplicadas na Determinação da Atividade Metanogênica Específica – AME. *Biscaro AFV, Passos JRS. Rev. Bras. Biom.* 28(1):141-150.
- 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.
- 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.
- LI, T., MENG, W., WANG, Y., VALIA, A., JAMSANDEKAR, R., KUMAR, R., MUZZIO, F. J., GLASSER, B. J. (2022). Effect Of Liquid Addition on the Bulk and Flow Properties of Cohesive Powders. *Particulate Science and Technology*, Vol. 40, n. 2, p.141-150.
- MACARINGUE, A. A. (2019), Determinação da Umidade Crítica em Processos de Emissão de Poeira Aplicados a Minério de Ferro e Carvão. PPEMPM/ISPT – Tete – Moçambique, 96p. (dissertação de mestrado).
- 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.
- 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.
- SCHULZE, D. (2008), *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer, Vol. 22.
- VANKA, K. S., SHUKLA, S., GOMEZ, H. M., JAMES, C., PALANISAMI, T., WILLIAMS, K., CHAMBER, D. C., BRITTON, W. J., ILIC, D., HANSBRO, P. M., HORVAT, J. C. (2022). Understanding the pathogenesis of occupational coal and silica dust-associated lung disease. *European Respiratory Review*, Vol. 31 (165).
- WANG, R., LI, Q., WANG, R., CHANG, C., GUO, Z., LI, J., ZHOU, N. (2021). Influence of wind velocity and soil size distribution on emitted dust size distribution: A wind tunnel study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 126, p.e2020JD033768.