RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 01/10/2026 | aceito: 08/10/2026 | publicação: 13/10/2026

Caracterização das propriedades físicas e dos riscos associados às poeiras de soja e farelo de soja

Characterization of the physical properties and risks associated with soybean and soybean meal dusts

Caracterización de las propiedades físicas y de los riesgos asociados al polvo de soja y harina de soja

João Vítor Morais Resende – Universidade Federal de Lavras
Gabriel Alves Souza – Universidade Federal de Lavras
Ednilton Tavares de Andrade – Universidade Federal de Lavras
Filipe Da Silva De Oliveira – Universidade Federal de Lavras
Bárbara Lemes Outeiro Araújo – Universidade Federal de Lavras

Resumo: A geração de poeiras durante o armazenamento de produtos agrícolas pode representar riscos à saúde dos trabalhadores e à segurança das unidades armazenadoras. Assim, este estudo teve como objetivo caracterizar fisicamente as poeiras de soja e farelo de soja, visando identificar possíveis riscos ocupacionais e de explosão associados às suas características. Foram analisadas amostras de poeira de soja, coletadas em Ijaci–MG, e de farelo de soja, coletadas em Paranaguá–PR, quanto ao teor de água, à granulometria e ao Poder Calorífico Superior (PCS). Os resultados mostraram que a poeira de farelo de soja apresentou maior PCS (19,48 MJ kg^{-1}) e maior teor de água (12,91% b.u.) em comparação à poeira de soja (16,98 MJ kg^{-1} e 10,98% b.u., respectivamente), além de distribuição granulométrica mais fina (D50 de 171,38 µm contra 518,22 µm). A fração inferior a 100 µm representou aproximadamente 1% da massa de ambas as poeiras e merece atenção quanto à exposição ocupacional, devido ao menor tamanho das partículas e à possibilidade de penetração no trato respiratório. As características granulométricas e o PCS observados indicam possíveis riscos associados à exposição ocupacional e à combustibilidade dessas poeiras.

Palavras-chave: Granulometria. Poder calorífico. Teor de água. Combustibilidade. Exposição ocupacional.

Abstract: Dust generation during the storage of agricultural products can pose risks to worker health and the safety of storage facilities. Thus, this study aimed to physically characterize soybean dust and soybean meal dust to identify potential occupational and explosion risks associated with their properties. Samples of soybean dust (collected in Ijaci, MG) and soybean meal dust (collected in Paranaguá, PR) were analyzed for moisture content, particle size distribution, and Gross Calorific Value (GCV). The results showed that soybean meal dust exhibited a higher GCV (19.48 MJ kg^{-1}) and higher moisture content (12.91% w.b.) compared to soybean dust (16.98 MJ kg^{-1} and 10.98% w.b., respectively), as well as a finer particle size distribution (D50 of 171.38 µm versus 518.22 µm). The fraction smaller than 100 µm accounted for approximately 1% of the mass of both dust types and warrants attention regarding occupational exposure due to the smaller particle size and the potential for penetration into the respiratory tract. The observed particle size characteristics and GCV indicate potential risks associated with occupational exposure and the combustibility of these dusts.

Keywords: Particle size distribution. Calorific value. Moisture content. Combustibility. Occupational exposure.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 01/10/2026 | aceito: 08/10/2026 | publicação: 13/10/2026

Resumen: La generación de polvo durante el almacenamiento de productos agrícolas puede representar riesgos para la salud de los trabajadores y la seguridad de las instalaciones de almacenamiento. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar físicamente el polvo de soja y de harina de soja para identificar posibles riesgos ocupacionales y de explosión asociados a sus características. Se analizaron muestras de polvo de soja, recogidas en Ijaci–MG, y de harina de soja, recogidas en Paranaguá–PR, en cuanto al contenido de humedad, la granulometría y el poder calorífico superior (PCS). Los resultados mostraron que el polvo de harina de soja presentó mayor PCS (19,48 MJ kg^{-1}) y mayor contenido de humedad (12,91% b.h.) que el polvo de soja (16,98 MJ kg^{-1} y 10,98% b.h., respectivamente), además de una distribución granulométrica más fina (D50 de 171,38 µm frente a 518,22 µm). La fracción inferior a 100 µm representó aproximadamente el 1% de la masa de ambos tipos de polvo y merece atención en relación con la exposición ocupacional, debido al menor tamaño de las partículas y la posibilidad de penetración en el tracto respiratorio. Las características granulométricas y el PCS observados indican posibles riesgos asociados a la exposición ocupacional y la combustibilidad de estos tipos de polvo.

Palabras clave: Granulometría. Poder calorífico. Contenido de humedad. Combustibilidad. Exposición ocupacional.

1. Introdução

O Brasil ocupa posição de destaque na produção e na exportação mundial de soja, desempenhando importante papel no agronegócio. Na safra 2025/26, a produção nacional atingiu o recorde de 180,4 milhões de toneladas, o maior volume registrado na série histórica da Companhia Nacional de Abastecimento. Para o mesmo período, as exportações da oleaginosa foram estimadas em 116,1 milhões de toneladas (CONAB, 2026).

Esse crescimento da produção nacional amplia a demanda por infraestrutura de armazenamento e processamento de grãos e de seus subprodutos, entre os quais se destaca o farelo de soja, amplamente utilizado como fonte proteica na alimentação animal (THIAGO; SILVA, 2003).

A etapa de pós-colheita da soja compreende operações essenciais, como secagem, beneficiamento, transporte e armazenamento, destinadas a preservar a qualidade dos grãos até sua comercialização ou processamento (SOUZA et al., 2023). Durante essas operações, especialmente nas etapas de movimentação e armazenamento, ocorre a geração de material particulado em decorrência do atrito entre os grãos e do desprendimento de partículas durante o manuseio (ANDRADE; BORÉM, 2004).

A poeira gerada durante o processamento e a movimentação de grãos e seus subprodutos pode representar riscos à saúde dos trabalhadores e à segurança das instalações (PEIXOTO; FERREIRA, 2012). Do ponto de vista ocupacional, a exposição a essas partículas pode estar associada a efeitos adversos no sistema respiratório, incluindo doenças respiratórias e reações

alérgicas. Para fins de avaliação da exposição ocupacional, as partículas são classificadas em frações inalável, torácica e respirável, de acordo com convenções específicas relacionadas ao seu comportamento no trato respiratório (FUNDACENTRO, 2009).

Hansen et al. (2023), Eriksen et al. (2023) e Madsen et al. (2024) demonstraram que, em ambientes de manejo de resíduos orgânicos, a fração inalável do material particulado pode transportar bactérias e fungos, favorecendo sua deposição em diferentes regiões do trato respiratório. A presença de endotoxinas na poeira inalável também foi documentada, com concentrações que podem exceder limites ocupacionais sugeridos (Hansen et al., 2023).

Partículas com diâmetro inferior a 100 µm podem permanecer suspensas no ar por períodos prolongados, aumentando o tempo de exposição dos trabalhadores (ANDRADE; BORÉM, 2004). Além dos efeitos sobre a saúde, a presença de poeira suspensa pode representar risco de incêndio e explosão. Segundo a OSHA (1997), as poeiras estão entre as principais causas de explosões industriais, destacando-se as poeiras de grãos nesse contexto.

Quando aerodispersóides permanecem suspensos no ar em concentrações adequadas e entram em contato com uma fonte de ignição, pode ocorrer a formação de uma atmosfera explosiva, capaz de desencadear incêndios e explosões (SÁ, 2007). Santamaria-Herrera et al. (2023) demonstraram que partículas de menor granulometria, por apresentarem maior relação entre área superficial e massa, podem favorecer a ignição e a propagação da chama. Os autores observaram comportamento explosivo em teores de água de aproximadamente 30% para partículas menores que 125 µm, enquanto, para partículas entre 125 e 250 µm, esse comportamento foi observado até aproximadamente 14% de teor de água. Dessa forma, partículas de menor tamanho podem apresentar maior suscetibilidade à ignição e à propagação da combustão em determinadas condições.

Em unidades armazenadoras, a geração e o acúmulo de poeira durante as operações de movimentação e processamento, associados à presença de possíveis fontes de ignição, como instalações elétricas, superfícies metálicas e rolamentos submetidos a atrito excessivo, podem favorecer a ocorrência de incêndios e explosões. Durante essas operações, estima-se que entre 0,1% e 1% do volume de grãos processados seja convertido em material particulado (ANDRADE; BORÉM, 2004).

Apesar das informações disponíveis sobre os riscos associados às poeiras de produtos agrícolas em unidades armazenadoras (SÁ, 2007; PEIXOTO; FERREIRA, 2012; SALIBA, 2016), ainda são necessárias investigações sobre as características das poeiras de soja e de farelo de soja geradas em condições reais de armazenamento no Brasil, sobretudo quanto as propriedades relacionadas à exposição ocupacional e à combustibilidade desses materiais.

O objetivo deste estudo foi caracterizar fisicamente as poeiras de soja e de farelo de soja geradas em unidades armazenadoras, bem como avaliar os potenciais riscos ocupacionais e de explosão associados a esses materiais no ambiente de trabalho.

2 Marco teórico

2.1. Processamento agroindustrial e geração de material particulado

Durante a movimentação e o processamento de produtos agrícolas, o atrito e os impactos mecânicos podem promover a fragmentação dos grãos e o desprendimento de partículas, contribuindo para a geração de poeira (KHAN et al., 2022). O teor de água do produto também influencia esse processo, uma vez que a redução da umidade pode aumentar a fragilidade dos grãos e favorecer a formação de partículas durante o manuseio (SALETNIK et al., 2021). A geração de material particulado durante essas operações pode resultar em concentrações elevadas de poeira nas proximidades de equipamentos como moegas e secadores, tornando necessário o controle da qualidade do ar para reduzir a exposição ocupacional e minimizar riscos às instalações (HALSTENSEN et al., 2007).

As partículas geradas podem permanecer dispersas no ar, caracterizando-se como aerodispersóides, cujo comportamento é influenciado por fatores como tamanho, densidade, forma das partículas e condições de ventilação do ambiente (HUÉSCAR MEDINA et al., 2015). Partículas de menor tamanho apresentam maior capacidade de permanecer suspensas e podem ser transportadas pelas correntes de ar por períodos prolongados (FUMAGALLI et al., 2016). Com a redução da velocidade do ar, parte desse material pode se depositar sobre máquinas, estruturas e plataformas, formando camadas de poeira combustível (BU et al., 2019). A ressuspensão desse material depositado, provocada por vibrações ou outros distúrbios, pode contribuir para a formação de atmosferas com concentração de poeira suficiente para favorecer a ocorrência de explosões secundárias (JOSEPH, 2007).

A caracterização do material particulado é importante para a compreensão de sua dinâmica no ambiente de trabalho e para o estabelecimento de medidas de controle. Métodos de amostragem ativa podem ser empregados para determinar a concentração de partículas suspensas, utilizando sistemas de aspiração associados a filtros apropriados (DOUWES et al., 2003). A determinação gravimétrica permite quantificar a massa de material particulado coletado, enquanto técnicas como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) podem fornecer informações sobre a morfologia e o tamanho das partículas (BOATMAN et al., 1988). Essas informações podem subsidiar a seleção e o dimensionamento de medidas de controle,

como sistemas de ventilação local exaustora e filtros de mangas, contribuindo para a redução da exposição ocupacional e do acúmulo de poeira nas instalações (KHAN et al., 2022).

2.2. Propriedades físicas: Distribuição granulométrica, umidade e comportamento da poeira

A distribuição granulométrica constitui uma importante característica das poeiras geradas durante as operações agroindustriais, uma vez que o tamanho das partículas influencia seu comportamento no ambiente e sua interação com processos de combustão. A redução do tamanho das partículas aumenta a relação entre área superficial e massa, favorecendo o contato com o oxigênio e podendo facilitar a transferência de calor e a liberação de componentes voláteis durante a combustão (HUÉSCAR MEDINA et al., 2015; FUMAGALLI et al., 2016). Dessa forma, partículas de menor tamanho podem apresentar maior suscetibilidade à ignição e à propagação da combustão, embora o comportamento de uma poeira em situações de incêndio ou explosão também dependa de fatores como composição, concentração de partículas no ar, teor de água e presença de fonte de ignição (REDING; SHIFLETT, 2018; KHAN et al., 2022).

Além de influenciar o comportamento durante a combustão, a granulometria interfere na permanência das partículas em suspensão no ambiente. Partículas de menor tamanho apresentam maior capacidade de permanecer dispersas e de serem transportadas pelas correntes de ar, enquanto partículas maiores tendem a sedimentar mais rapidamente (HALSTENSEN et al., 2007). Parte do material particulado pode, portanto, depositar-se sobre máquinas, plataformas, vigas e outras superfícies das instalações agroindustriais, formando camadas de poeira combustível (BU et al., 2019). A ressuspensão desse material depositado, provocada por vibrações, movimentação de equipamentos ou outros distúrbios, pode aumentar a concentração de poeira no ar e contribuir para a ocorrência de explosões secundárias quando estão presentes condições favoráveis à ignição (JOSEPH, 2007).

A granulometria também apresenta importância para a avaliação da exposição ocupacional. O comportamento das partículas no sistema respiratório está relacionado às suas características aerodinâmicas, sendo utilizadas, para fins de higiene ocupacional, as convenções de frações inalável, torácica e respirável. Partículas pertencentes às frações de menor tamanho podem alcançar regiões mais profundas do trato respiratório, aumentando a possibilidade de deposição pulmonar e de efeitos adversos à saúde, dependendo da composição e da concentração do material inalado (DOUWES et al., 2000; DOUWES et al., 2003; HALSTENSEN et al., 2007). Dessa forma, a caracterização granulométrica das poeiras

constitui uma informação relevante tanto para a compreensão de seu comportamento no ambiente quanto para a avaliação da exposição dos trabalhadores.

O teor de água também exerce influência sobre o comportamento das poeiras durante a combustão. A presença de água pode absorver parte da energia térmica fornecida ao sistema durante a ignição, uma vez que a evaporação da água requer energia, contribuindo para a redução da temperatura disponível para a combustão (KUAI et al., 2011; MITTAL, 2013). Consequentemente, o aumento do teor de água pode reduzir a facilidade de ignição e modificar a intensidade da combustão, embora esse efeito dependa das características do material e das condições em que ocorre a ignição (SALETNIK et al., 2021).

Assim, tanto a distribuição granulométrica quanto o teor de água constituem propriedades relevantes para a caracterização das poeiras agrícolas. Partículas menores tendem a apresentar maior área superficial relativa e maior capacidade de permanecer em suspensão, enquanto o aumento do teor de água pode reduzir sua suscetibilidade à ignição. A avaliação conjunta dessas propriedades permite compreender melhor o comportamento das poeiras de soja e de farelo de soja e suas possíveis implicações para a exposição ocupacional e a segurança das unidades armazenadoras.

2.3. Caracterização energética e comportamento combustível das poeiras

O potencial energético das poeiras de origem orgânica pode ser caracterizado por meio do Poder Calorífico Superior (PCS), parâmetro que representa a quantidade de energia liberada durante a combustão completa do material, considerando também a energia associada à condensação do vapor de água formado durante o processo (SALETNIK et al., 2021). Quando resíduos de grãos são submetidos a processos intensos de secagem ou a tratamentos térmicos, podem ocorrer alterações em sua composição e estrutura, com redução do teor de água e de determinados compostos voláteis e consequente aumento relativo da fração de carbono fixo (HUÉSCAR MEDINA et al., 2015).

Segundo Saletnik et al. (2021), tratamentos térmicos aplicados à biomassa podem aumentar sua energia disponível em até 62%, modificando seu comportamento durante a combustão. Em ambientes confinados, essas alterações podem contribuir para condições mais favoráveis à propagação da combustão de poeiras dispersas no ar. Mesmo em seu estado não tratado, as poeiras de origem agrícola apresentam conteúdo energético relevante, especialmente quando submetidas a condições que favoreçam sua ignição e combustão (REIS et al., 2012).

O teor de água constitui outro fator importante no comportamento da poeira durante a combustão. A água presente nas partículas absorve parte da energia térmica fornecida ao sistema para promover sua evaporação, reduzindo a energia inicialmente disponível para o aquecimento e a ignição do material combustível (MITTAL, 2013). Dessa forma, o aumento do teor de água pode dificultar a ignição e reduzir a intensidade da combustão, embora esse efeito dependa das características da poeira e das condições de dispersão e ignição. Assim, a umidade atua como um fator capaz de modificar o comportamento da poeira durante processos de combustão, sem, contudo, eliminar necessariamente o risco associado à presença de material particulado combustível.

Em unidades agroindustriais, o acúmulo contínuo de poeira sobre máquinas, vigas, plataformas e outras superfícies pode aumentar a disponibilidade de material combustível no ambiente e contribuir para a ocorrência e propagação de incêndios e explosões (JOSEPH, 2007). Durante uma explosão, a elevada concentração de partículas suspensas pode alterar as condições de combustão e favorecer a formação de produtos parcialmente queimados, alguns dos quais podem se depositar sobre as superfícies das instalações (BU et al., 2019). Esses materiais aquecidos ou incandescentes podem atuar como fontes secundárias de ignição e contribuir para a ocorrência de incêndios em camadas de poeira depositada, conhecidos como *layer fires*.

Superfícies de equipamentos que atingem temperaturas elevadas, decorrentes de atrito, superaquecimento ou outras condições operacionais, também podem constituir pontos quentes (*hotspots*) capazes de iniciar a combustão de poeiras depositadas (BU et al., 2019). Uma vez iniciada a combustão de uma camada de poeira, o calor liberado pode favorecer a ignição de materiais combustíveis próximos e, caso a poeira depositada seja novamente dispersa no ambiente, contribuir para a formação de uma nova nuvem combustível. Esse processo pode favorecer a ocorrência de explosões secundárias, cuja intensidade pode ser influenciada pela quantidade de poeira disponível, pelas condições de dispersão, pelo confinamento e pela presença de fontes de ignição (JOSEPH, 2007; BU et al., 2019).

A possibilidade de propagação da combustão em camadas de poeira também está relacionada à espessura e às características do depósito. Camadas mais finas apresentam maior facilidade de dissipação do calor para as superfícies adjacentes, enquanto depósitos mais espessos podem favorecer a retenção de calor e a continuidade do processo de combustão (BU et al., 2019). Dessa forma, o acúmulo de poeira combustível deve ser considerado um importante fator de segurança em instalações de armazenamento e processamento de produtos

agrícolas, especialmente quando associado a fontes potenciais de ignição e à possibilidade de ressuspensão do material particulado.

2. Material e método

O presente trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais. O material analisado foi constituído por poeiras de soja e de farelo de soja, coletadas em unidades armazenadoras localizadas em Ijaci–MG e Paranaguá–PR, respectivamente.

A coleta das amostras foi realizada posteriormente a identificação dos pontos de deposição do material particulado suspenso no ambiente. A amostragem foi realizada em pontos localizados a mais de 1,5 m de altura em relação ao piso, buscando obter material depositado em regiões correspondentes à altura de exposição dos trabalhadores (FUNDACENTRO, 2009).

O teor de água das poeiras foi determinado pelo método de estufa, adaptado das Regras para Análise de Sementes, à temperatura de 105 ± 3 °C, durante 24 h (BRASIL, 2009). Para cada determinação, foram utilizadas aproximadamente 25 g de amostra, com três repetições.

A distribuição granulométrica das poeiras foi determinada utilizando-se um vibrador de peneiras da marca Lucadema, por meio da separação das partículas de acordo com o tamanho das aberturas das peneiras. O ensaio foi realizado em duas repetições, utilizando-se aproximadamente 200 g de amostra em cada repetição, depositada sobre a peneira de maior abertura. O conjunto de peneiras foi submetido à vibração na intensidade máxima (nível 10), durante 15 minutos.

O conjunto de peneiramento foi composto por oito peneiras, com aberturas de 2.000, 1.400, 850, 180, 150, 106, 90 e 75 µm. Abaixo da última peneira foi colocado um recipiente coletor, denominado “fundo”, destinado à retenção das partículas com tamanho inferior a 75 µm. Depois do peneiramento, cada peneira e o recipiente coletor foram pesados, permitindo determinar a massa de material retida em cada classe granulométrica e sua respectiva proporção em relação à massa total da amostra.

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica IKA, modelo C200. Inicialmente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 105 ± 3 °C, durante 24 h. Após a secagem, aproximadamente 0,25 g de cada amostra foram pesados e acondicionados no cadinho da bomba calorimétrica. Em seguida, o recipiente foi pressurizado com oxigênio e submetido à combustão, sendo determinada a energia liberada durante a queima da amostra.

3. Resultados e discussão

Os valores de poder calorífico superior (PCS) diferiram significativamente entre os materiais avaliados. A poeira de farelo de soja apresentou PCS de 19,48 MJ kg^{-1}, superior ao observado para a poeira de soja (16,98 MJ kg^{-1}), indicando maior conteúdo energético por unidade de massa para a poeira de farelo de soja nas condições em que as amostras foram avaliadas. Os resultados das análises de PCS, fração granulométrica inferior a 100 µm, diâmetro médio D50 e teor de água são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Poder calorífico superior (PCS), fração granulométrica inferior a 100 µm, diâmetro médio D50 e teor de água das poeiras de farelo de soja e soja.

Análises	Poeira	
	Farelo de soja	Soja
PCS (MJ.kg^{-1})	19,48 a	16,98 b
Granulometria (< 100 µm)	1,1 a	1,0 a
Teor de água (% b.u)	12,91 a	10,98 b
Diâmetro médio D50 (µm)	171,38	518,22

Letras iguais na mesma linha indicam que não há diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5%.

A diferença observada no PCS pode estar relacionada à composição química dos materiais. O farelo de soja é constituído por uma fração orgânica proveniente do processamento dos grãos, podendo apresentar proporções distintas de proteínas, lipídios, carboidratos e outros compostos em relação à poeira originada diretamente dos grãos de soja. Xu, Xu e Liu (2024) destacam a contribuição dos constituintes orgânicos do farelo para suas características energéticas. Assim, diferenças na composição da matéria orgânica podem contribuir para o maior PCS observado na poeira de farelo de soja.

O teor de água também diferiu significativamente entre os materiais, sendo de 12,91% para a poeira de farelo de soja e 10,98% para a poeira de soja. Como a água não contribui para a liberação de energia durante a combustão e ainda absorve energia na forma de calor sensível e latente, maiores teores de água tendem a reduzir o poder calorífico quando este é expresso em base úmida. Portanto, o maior PCS observado para a poeira de farelo de soja, mesmo apresentando maior teor de água, reforça a possibilidade de diferenças na composição da fração combustível entre os materiais.

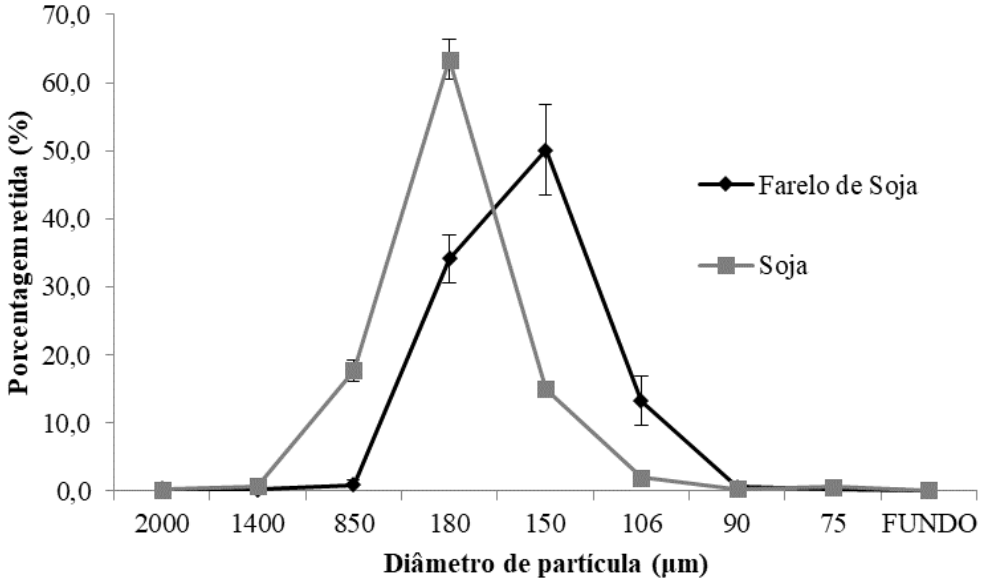
Os valores obtidos encontram-se na faixa observada para outras biomassas. Huéscar Medina et al. (2015) relataram PCS de 21,2 MJ kg^{-1} para *Norway spruce* e 20,8 MJ kg^{-1} para *Southern pine*, valores próximos, embora superiores, ao obtido para a poeira de farelo de soja.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 01/10/2026 | aceito: 08/10/2026 | publicação: 13/10/2026

Saletnik et al. (2021), por sua vez, observaram PCS de aproximadamente 17,34 MJ kg^{-1} para biomassa não processada de macieira, valor próximo ao observado para a poeira de soja. Essas diferenças evidenciam a influência da composição e das características da matéria-prima sobre o conteúdo energético das biomassas.

A distribuição granulométrica das amostras apresentou diferenças entre os materiais (Figura 1). A poeira de soja concentrou aproximadamente 64% de sua massa na fração de 180 µm, enquanto a poeira de farelo de soja apresentou maior retenção na fração de 150 µm, correspondente a aproximadamente 50% da massa. Observou-se, portanto, uma distribuição deslocada para menores diâmetros na poeira de farelo de soja, indicando maior participação relativa de partículas menores nesse material.

Figura 1. Distribuição granulométrica das poeiras de farelo de soja e soja.



Essa diferença também é evidenciada pelo diâmetro médio correspondente a 50% da distribuição (D50). A poeira de farelo de soja apresentou D50 de 171,38 µm, enquanto a poeira de soja apresentou 518,22 µm. Portanto, metade da massa da distribuição granulométrica da poeira de farelo de soja encontra-se em partículas menores que aproximadamente 171 µm, enquanto, para a poeira de soja, esse valor foi de aproximadamente 518 µm.

O valor obtido para a poeira de farelo de soja foi superior ao reportado por Xu, Xu e Liu (2024), que encontraram D50 de 23,197 µm. Essa diferença pode estar relacionada à forma de obtenção das amostras. No presente estudo, a poeira foi coletada diretamente do ambiente de processamento, enquanto Xu, Xu e Liu (2024) utilizaram farelo de soja submetido à moagem. O processo de moagem tende a produzir partículas menores, podendo explicar parte da diferença observada entre os estudos. Para biomassas de origem lenhosa, Huéscar Medina et al. (2015) relataram D50 de 712 e 722 µm para *Norway spruce* e *Southern pine*, respectivamente,

enquanto Saletnik et al. (2021) encontraram D50 entre 73,5 e 86,365 μm para biochars provenientes de galhos de árvores frutíferas. Essas comparações demonstram que a distribuição granulométrica é influenciada pela origem da matéria-prima e, principalmente, pelas operações de processamento, geração, coleta e preparação das amostras.

A fração de partículas com diâmetro inferior a 100 μm representou 1,1% da massa da poeira de farelo de soja e 1,0% da poeira de soja, não sendo observada diferença estatística entre os materiais. Apesar da pequena proporção mássica, essa fração apresenta relevância sob a perspectiva da saúde ocupacional, uma vez que partículas de menores dimensões apresentam maior potencial de permanecer suspensas no ar e alcançar regiões mais profundas do trato respiratório, dependendo de suas características aerodinâmicas e das condições de exposição.

No contexto das poeiras orgânicas, a fração fina pode atuar como veículo para microrganismos e componentes biologicamente ativos, como endotoxinas e β-glucanos. Douwes et al. (2003) e Halstensen et al. (2007) associaram a exposição ocupacional a poeiras orgânicas a respostas inflamatórias e alterações respiratórias. Douwes et al. (2000), por sua vez, observaram alterações em marcadores inflamatórios em trabalhadores expostos a bioaerossóis, evidenciando que frações relativamente pequenas em massa podem apresentar relevância biológica. Dessa forma, embora a fração inferior a 100 μm represente aproximadamente 1% da massa total das poeiras avaliadas, sua presença deve ser considerada nas estratégias de controle da exposição ocupacional em ambientes de processamento.

As características granulométricas, o PCS e o teor de água também são relevantes para a avaliação do comportamento das poeiras combustíveis. O maior PCS observado para a poeira de farelo de soja indica maior conteúdo energético por unidade de massa, enquanto o menor D50 evidencia maior participação relativa de partículas menores. Partículas de menores dimensões apresentam maior área superficial específica e podem favorecer os processos de transferência de calor, aquecimento e combustão quando dispersas no ar. Huéscar Medina et al. (2015) demonstraram que a redução do tamanho das partículas pode favorecer a reatividade de poeiras combustíveis, em razão das alterações nos mecanismos de transferência de calor e massa e da maior disponibilidade dos componentes combustíveis.

Fumagalli et al. (2016) também discutiram a influência do tamanho das partículas sobre a explosividade, destacando que, para partículas suficientemente pequenas, a influência da redução adicional do tamanho pode tornar-se menos pronunciada. Assim, embora a fração inferior a 100 μm apresente características que podem favorecer sua participação nos processos de ignição e propagação da chama, sua baixa participação mássica não permite afirmar, isoladamente, que ela seja responsável pela ocorrência ou pela severidade de uma eventual

explosão. O comportamento da nuvem de poeira depende também da concentração de partículas no ar, energia de ignição, disponibilidade de oxigênio, teor de água e demais propriedades do material.

O teor de água também pode modificar o comportamento de uma nuvem de poeira. A poeira de farelo de soja apresentou teor de água significativamente maior (12,91%) que a poeira de soja (10,98%). O aumento da umidade pode influenciar a dispersão e a aglomeração das partículas, além de interferir nos processos de combustão. Mittal (2013), ao avaliar poeiras de carvão, observou influência do teor de água sobre a Concentração Limite de Oxigênio (LOC), enquanto Addai et al. (2016) discutiram a influência da umidade sobre mecanismos relacionados à dispersão e ao comportamento de poeiras combustíveis. Embora esses estudos tenham sido realizados com outros materiais, evidenciam que a umidade deve ser considerada na interpretação do comportamento das poeiras.

De forma conjunta, a poeira de farelo de soja apresentou maior PCS (19,48 MJ kg^{-1}), menor D50 (171,38 µm) e maior teor de água (12,91%), em comparação à poeira de soja, que apresentou 16,98 MJ kg^{-1}, 518,22 µm e 10,98%, respectivamente. Esses resultados evidenciam diferenças relevantes entre os materiais quanto às suas características energéticas, granulométricas e de umidade. Entretanto, a determinação da explosividade requer ensaios específicos, como pressão máxima de explosão (Pmax), taxa máxima de aumento de pressão (Kst), concentração mínima explosiva (MEC), energia mínima de ignição (MIE) e concentração limite de oxigênio (LOC).

Dessa forma, os resultados obtidos constituem uma caracterização preliminar das propriedades que podem influenciar o comportamento das poeiras e fornecem subsídios para a avaliação dos riscos associados ao armazenamento, transporte e processamento desses materiais, mas não permitem, isoladamente, quantificar ou classificar a severidade de uma eventual explosão.

Considerações finais

As poeiras de soja e de farelo de soja apresentaram diferenças quanto ao poder calorífico, teor de água e distribuição granulométrica. A poeira de farelo de soja apresentou maior PCS (19,48 MJ kg^{-1}), maior teor de água (12,91% b.u.) e menor D50 (171,38 µm) em comparação à poeira de soja (16,98 MJ kg^{-1}; 10,98% b.u.; 518,22 µm). A fração inferior a 100 µm correspondeu a aproximadamente 1% da massa de ambas as poeiras, apresentando relevância para a exposição ocupacional e para o comportamento de poeiras combustíveis.

Esses resultados reforçam a necessidade de medidas de controle durante o manuseio e processamento desses materiais, embora a caracterização da explosividade exija ensaios específicos.

Referências

ADDAI, E. K.; GABEL, D.; KRAUSE, U. Experimental investigations of the minimum ignition energy and the minimum ignition temperature of inert and combustible dust cloud mixtures. Journal of Hazardous Materials, v. 307, p. 302–311, 2016.

ADEBIYI, A. A.; KOK, J. F. Climate models miss most of the coarse dust in the atmosphere. Science Advances, v. 6, n. 15, eaaz9507, 2020.

ADEBIYI, A. A.; KOK, J. F.; MURRAY, B. J.; RYDER, C. L.; STUUT, J.-B. W.; KAHN, R. A.; KNIPPERTZ, P.; FORMENTI, P.; MAHOWALD, N. M.; PEREZ GARCIA-PANDO, C.; KLOSE, M.; ANSMANN, A.; SAMSET, B. H.; ITO, A.; BALKANSKI, Y.; DI BIAGIO, C.; ROMANIAS, M. N.; HUANG, Y.; MENG, J. A review of coarse mineral dust in the Earth system. Aeolian Research, v. 60, 100849, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM International, 2004. 8 p.

AMYOTTE, P. R.; MINTZ, K. J.; PEGG, M. J.; SUN, Y.-H.; WILKIE, K. I. Laboratory investigation of the dust explosibility characteristics of three Nova Scotia coals. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 4, n. 2, p. 102–109, 1991.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. A safra pelos ares. Revista Cultivar Máquinas, ed. 28, 2004. Disponível em: http://www.grupocultivar.com.br/arquivos/m28_acidentes.pdf. Acesso em: 20 set. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.

ASTM. D5865-03: Standard test method for gross calorific value of coal and coke. In: Annual book of ASTM standards. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2003.

BOATMAN, E. S.; COVERT, D.; KALMAN, D.; LUCHTEL, D.; OMENN, G. S. Physical, morphological, and chemical studies of dusts derived from the machining of composite-epoxy materials. Environmental Research, v. 45, n. 2, p. 242–255, 1988.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília: Mapa/ACS, 2009.

BU, Y.; YUAN, C.; AMYOTTE, P.; LI, C.; CAI, J.; LI, G. Ignition hazard of non-metallic dust clouds exposed to hotspots versus electrical sparks. Journal of Hazardous Materials, v. 365, p. 895–904, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Conab estima produção de 361,7 milhões de toneladas de grãos na safra 2025/26. Brasília: Conab, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/conab-estima-producao-de-361-7-milhoes-de-toneladas-de-graos-na-safra-2025-26. Acesso em: 20 set. 2026.

DOUWES, J.; THORNE, P.; PEARCE, N.; HEEDERIK, D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. Annals of Occupational Hygiene, v. 47, n. 3, p. 187–200, 2003.

DOUWES, J.; WOUTERS, I.; DUBBELD, H.; VAN ZWIETEN, L.; STEERENBERG, P.; DOEKES, G.; HEEDERIK, D. Upper airway inflammation assessed by nasal lavage in compost workers: A relation with bio-aerosol exposure. American Journal of Industrial Medicine, v. 37, n. 5, p. 459–468, 2000.

ERIKSEN, E.; MADSEN, A. M.; AFANOU, A. K.; STRAUMFORS, A.; EILER, A.; GRAFF, P. Occupational exposure to inhalable pathogenic microorganisms in waste sorting. International Journal of Hygiene and Environmental Health, v. 253, p. 114240, 2023.

FUMAGALLI, A.; DERUDI, M.; ROTA, R.; COPELLI, S. Estimation of the deflagration index KSt for dust explosions: A review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 44, p. 271–282, 2016.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. Norma de higiene ocupacional: procedimento técnico: coleta de material particulado sólido suspenso no ar de ambientes de trabalho. São Paulo: Fundacentro, 2007. 24 p. (Normas de higiene ocupacional - NHO; 08). ISBN 978-85-98117-39-3.

HALSTENSEN, A. S.; NORDY, K. C.; EDUARD, W.; et al. Determinants of microbial exposure in grain farming. Annals of Occupational Hygiene, v. 51, n. 7, p. 581–592, 2007.

HANSEN, K. K.; SCHLÜSSNER, V.; BROBERG, K.; ØSTERGAARD, K.; FREDERIKSEN, M. W.; MADSEN, A. M.; KOLSTAD, H. A. Exposure levels of dust, endotoxin, and microorganisms in the Danish recycling industry. Annals of Work Exposures and Health, v. 67, n. 7, p. 816–830, 2023.

HUÉSCAR MEDINA, C.; MACCOITIR, B.; SATTAR, H.; SLATTER, D. J. F.; PHYLAKTOU, H. N.; ANDREWS, G. E.; GIBBS, B. M. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m^3 dust explosion equipment. Fuel, v. 151, p. 91–101, 2015.

JOSEPH, P. Domino effect in dust explosions. Journal of Hazardous Materials, v. 143, n. 1-2, p. 10–18, 2007.

KHAN, A. M.; RAY, S. K.; MOHALIK, N. K.; MISHRA, D.; MANDAL, S.; PANDEY, J. K. Experimental and CFD simulation techniques for coal dust explosibility: A review. Mining, Metallurgy & Exploration, v. 39, p. 1445–1463, 2022.

KUAI, N.; HUANG, W.; YUAN, J.; DU, B.; LI, Z.; WU, Y. Experimental investigations of coal dust-inertant mixture explosion behaviors. Procedia Engineering, v. 26, p. 1337–1345, 2011.

LIN, X.; YUAN, Z.; AMYOTTE, P. Suppression of dust explosions using solid powders: Mechanism and application. Powder Technology, v. 366, p. 402–411, 2020.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de Corymbia spp para uso industrial. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.

MADSEN, A. M.; RASMUSSEN, P. U.; FREDERIKSEN, M. W. Fungal and bacterial species on biowaste workers' hands and inhalation zone, and potential airway deposition. Waste Management, v. 183, p. 290–301, 2024.

MITTAL, M. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 26, n. 6, p. 1106–1112, 2013.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). Combustible Dust: Safety and Injury Prevention. Instruction Manual, 1997.

PEIXOTO, N. H.; FERREIRA, L. S. Higiene Ocupacional I. Santa Maria: UFSM, CTISM, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. aos 42 meses de idade. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137–149, 2013.

REDING, N. S.; SHIFLETT, M. B. Metal dust explosion hazards: A technical review. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 61, n. 36, p. 13242–13256, 2022.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus urophylla em diferentes locais de plantio. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277–290, 2012.

SÁ, A. Efeito devastador. Revista Proteção, ed. 181, 2007. Disponível em: http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/silo.htm. Acesso em: 20 set. 2026.

SÁ, A. Risco de explosão. Revista Proteção, v. 61, 1997.

SALETNIK, B.; BAJCAR, M.; SALETNIK, A.; ZAGULA, G.; PUCHALSKI, C. Effect of the pyrolysis process applied to waste branches biomass from fruit trees on the calorific value of the biochar and dust explosivity. Energies, v. 14, n. 16, 4898, 2021.

SALIBA, T. M. Manual prático de avaliação e controle de poeira e outros particulados: PPRA. 8. ed. São Paulo: LTr, 2016.

SANTAMARÍA-HERRERA, A.; HOYUELOS, F. J.; CASADO-MARCOS, C. Characterization of the explosiveness of wood dust. Process Safety and Environmental Protection, v. 169, p. 252–259, 2023.

SANTOS, A. M. O tamanho das partículas de poeira suspensas no ar dos ambientes de trabalho. São Paulo: Fundacentro, 2001.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C. N.; CASTRO, A. F. N. M. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no Estado do Rio Grande do Norte. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 491–502, 2013.

SOUZA, Diene Gonçalves et al. CO_2 monitoring associated with the quality of soybean grains stored in different moisture contents. Food Science and Technology, Campinas, v. 43, e29023, 2023.

THIAGO, L. R. L. de S.; SILVA, J. M. da. Soja na alimentação de bovinos. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2003. 6 p. (Embrapa Gado de Corte. Circular técnica, 31).

VINCENT, J. H.; MARK, D.; MILLER, B. G.; ARMBRUSTER, L.; OGDEN, T. L. Aerosol inhalability at higher windspeeds. Journal of Aerosol Science, v. 21, n. 4, p. 577–586, 1990.

XU, J.; XU, K.; LIU, B. Experimental Study on the Characteristics of Bicarbonate Inhibiting Soybean Meal Dust Explosion. Journal of Northeastern University (Natural Science), v. 45, n. 12, p. 1798–1804, 2024.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.