

Análisis de sensibilidad de parámetros seleccionados en simulación DEM de la molienda de maíz

Chiaravalle, A.G. ^{1,2[0000-0003-0403-4411] (A)}, Cotabarren, I.M. ^{1,2[0000-0002-2942-5163] (B)},
Piña, J. ^{1,2[0000-0003-2623-123X] (C)}

¹ Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI, UNS-CONICET), Camino La Carrindanga
Km 7, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

² Departamento de Ingeniería Química (DIQ), Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía
Blanca, Buenos Aires, Argentina

(A) achiaravalle@plapiqui.edu.ar

(B) icotabarren@plapiqui.edu.ar

(C) julianap@plapiqui.edu.ar

Resumen. La simulación de procesos de reducción de tamaño es una de las capacidades más sofisticadas del método de elementos discretos (DEM). En el presente trabajo, se aborda un análisis de sensibilidad de un modelo DEM para molienda de maíz en un molino de martillos. Se estudió el efecto de la velocidad de rotación de las aspas como condición operativa. Se exploraron estrategias de cálculo para reducir el tiempo de simulación, determinando valores adecuados para parámetros del software, así como la sensibilidad del modelo a ellos. El valor óptimo del módulo de Young del maíz, propiedad inherente a la elasticidad de los materiales, se determinó analizando la influencia de esta propiedad en la performance de la molienda. Se estudió la variación de los mencionados parámetros del modelo, variables operativas y propiedades del maíz identificando cuáles eran los más relevantes y su impacto sobre la distribución de tamaño de partículas y potencia consumida en la molienda. Estos hallazgos conducen a un mayor entendimiento de las capacidades predictivas del modelo, permitiendo el subsecuente modelado de la operación a otras escalas.

Palabras clave: Método de elementos discretos, Molienda, Simulación.

Sensitivity analysis of selected parameters in DEM simulation for maize milling

Abstract. Simulation of size reduction processes is one of the most sophisticated capabilities of the discrete element method (DEM). In this work, a sensitivity analysis of a DEM model for maize milling in a hammer mill is addressed. The effect of the blades' rotation speed as an operating variable was studied. Calculation strategies were employed to reduce simulation time, determining appropriate values for software parameters as well as their effect on the model outcomes.

The optimal value for the Young's modulus of maize, a property inherent to the elasticity of materials, was determined by analyzing this property's influence on the milling performance. Overall, the variation of the mentioned model parameters, operating variables, and material properties was studied, identifying the most influential ones and their impact on the particle size distribution and milling power consumption. These findings lead to a better understanding of the model's predictive capabilities, allowing subsequent modeling of the operation at higher scales.

Keywords: Discrete element method, Milling, Simulation.

1 Introducción

La reducción de tamaño de partículas es una operación unitaria fundamental en la manufactura de productos alimenticios (Thomas et al., 2018). En la industria, el maíz es una de las materias primas mayormente utilizadas a nivel mundial debido a la estructura que aporta al producto y su valor nutricional (Shi et al., 2016), siendo el molino de martillos el equipo de preferencia para su molienda debido a su versatilidad y bajo costo de mantenimiento (Dey et al., 2013; Hu et al., 2021). A pesar de la importancia que reviste, la molienda es una operación ineficiente debido a la vacancia de modelos que describan adecuadamente su fenomenología, lo cual dificulta su escalado, capacidad de predicción de resultados y control del consumo energético (Chen et al., 2025).

El método de elementos discretos (*discrete element method*, DEM) es una herramienta de modelado mecánico para simular sistemas de partículas. Permite discretizar la simulación en intervalos y brindar resultados a la escala de las partículas individuales, confiriéndole capacidades predictivas muy superiores a los modelos empíricos (Chen et al., 2025). La simulación de procesos de reducción de tamaño en DEM se puede abordar por dos enfoques: el modelo de partícula unida (*bonded particle model*, BPM) o el modelo de reemplazo de partícula (*particle replacement model*, PRM).

La reducción de tamaño del maíz en DEM se ha abordado para ensayos de rotura estática o simulaciones de procesos simplificados, tanto mediante BPM como PRM (Chen et al., 2022, 2021, 2020b, 2020a). En los últimos años, los PRM han sido utilizados para simular diferentes equipos de molienda de otros materiales; destacan André y Tavares (2020) en simulaciones de trituradoras de cono, Bao et al. (2025) en un molino SAG o Nghipulile et al. (2024) para una trituradora rotativa offset. Los molinos de martillos han sido abordados por Doroszuk y Król (2022) para molienda de mineral de cobre y por Chen et al. (2025) para piedra caliza.

En trabajos previos, se llevó a cabo la medición y calibración de propiedades físicas y mecánicas para la simulación DEM del maíz, y se comenzó con el ajuste de parámetros de rotura para un PRM (Chiaravalle et al., 2023). Posteriormente, se completó y validó el ajuste de parámetros de rotura, y se llevaron a cabo ensayos de molienda experimental en un molino de martillos escala laboratorio (Perten mill 120, Perkin Elmer, Argentina) operado en continuo, para luego simularlos en DEM (Chiaravalle et al., 2025, 2024). Continuando con esta línea de investigación, en el presente trabajo se aborda un análisis de sensibilidad de parámetros seleccionados para el modelo DEM de

molienda de maíz. Se trabajó con el software Rocky DEM versión 2024 R2 (ANSYS), y se utilizó una estación de trabajo de 32 GB de memoria RAM y procesador Intel® Core™ i7–10,700 CPU @ 2.90 GHz.

2 Modelo de rotura

Se empleó el modelo de rotura de Tavares (Tavares y King, 2002, 1998). Es un PRM en el cual a cada partícula que ingresa a la simulación se le asigna un valor de energía específica de rotura E , en unidades de energía/masa, siguiendo una distribución log-normal truncada. En cuanto la partícula experimenta un contacto cuya energía es superior a E , la misma es reemplazada instantáneamente por fragmentos poliédricos que ocupan el mismo espacio geométrico, los cuales son generados en función del algoritmo de Laguerre-Voronoi. El modelo es idealmente capaz de representar cualquier material mediante el ajuste de sus parámetros (Tavares et al., 2020). Para una descripción detallada de sus fundamentos y la deducción de sus ecuaciones, referirse a (Tavares, 2022, 2009; Tavares y King, 2002, 1998).

El modelo cuenta con cuatro componentes clave:

- una ecuación de probabilidad de rotura;
- una ecuación implícita de acumulación de daño;
- un algoritmo de generación de fragmentos;
- y parámetros específicos del modelo implementado en Rocky DEM.

Los parámetros del modelo fueron calibrados mediante ensayos de compresión controlada, impacto simple e impacto múltiple, siguiendo los lineamientos de Tavares (2022), para el maíz, y realizando simulaciones de molienda a escala laboratorio en Rocky DEM. Los resultados de las simulaciones reflejaron satisfactoriamente los ensayos experimentales, validando el ajuste. Para una descripción detallada de las ecuaciones y los procedimientos de ajuste, referirse a (Chiaravalle et al., 2025, 2023).

3 Simulación DEM

3.1 Configuración de las simulaciones

El maíz fue representado mediante partículas poliédricas que conservaron la masa y volumen de los granos reales, mediante un procedimiento de análisis de imágenes y ajuste de dimensiones (Chiaravalle et al., 2023). La distribución de tamaño de partículas (*particle size distribution*, PSD) del maíz previo a la molienda fue determinada por sendos métodos (Chiaravalle et al., 2025). El molino de escala laboratorio fue dibujado en CAD 3d e implementado en las simulaciones, conservando la velocidad de rotación de las aspas de 10.000 rpm. Se simularon las diferentes configuraciones de tamaño de malla (1, 2 y 4 mm) y caudal de alimentación (100, 200 y 400 g/min) que se ensayaron experimentalmente, registrando los resultados predichos por el modelo en comparación con los ensayos reales (Chiaravalle et al., 2025). Para la determinación de la PSD de molienda, se configuró un volumen de control a la salida de la cámara del molino para capturar la información de los fragmentos tras ser procesados. La potencia se estimó a

partir del trabajo que realizan las aspas al aplicar fuerza a las partículas. El molino experimental junto a un grano de maíz puede verse en la Fig. 1, junto al molido dibujado en CAD 3d más una partícula poliédrica.

El coste computacional, que insuere constante incremento en el número de partículas y contactos a resolver y cuantificar a medida que ocurre la molienda en DEM, fue abordado mediante diferentes estrategias. Se optó por simular la molienda durante 2 segundos de operación, corroborando que fuese suficiente tiempo para que la operación en el modelo alcanzase el estado estacionario; se incrementó el intervalo de tiempo para registrar resultados; y se eliminaron los fragmentos una vez analizados y registrados, impidiendo su acumulación.

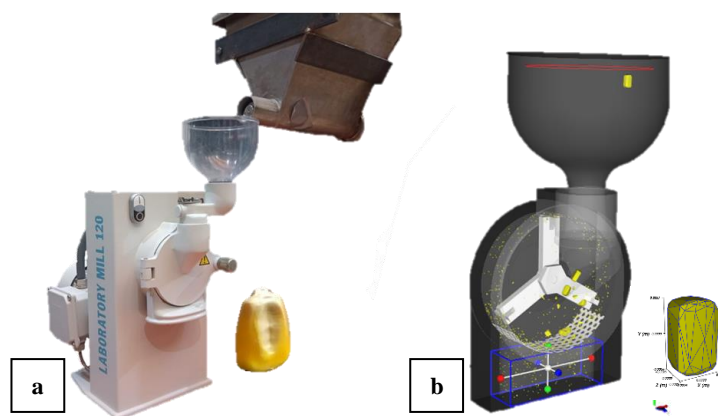


Fig. 1. a) Molino Perten mill 120 y grano de maíz. b) Molino en CAD 3d y partícula poliédrica.

3.2 Parámetros seleccionados

Se seleccionaron parámetros específicos con el objetivo de estudiar su efecto sobre los resultados. Para cada uno, se tomó como caso base una configuración de tamaño de malla-caudal de alimentación determinada, y se realizaron sucesivas simulaciones cambiando sistemáticamente el valor de uno o más parámetros, según el caso.

Se estudió la PSD del producto en comparación con la PSD experimental. Se analizó la forma y corrimiento de la PSD a tamaños mayores o menores con los cambios en las variables. Se registraron los tamaños característicos d_{10} , d_{50} y d_{90} , siendo éstos los correspondientes al 10, 50 y 90% de masa pasante acumulada, respectivamente, y el valor del coeficiente de determinación r^2 . Para los cambios en el consumo de potencia, se registró el promedio de cada simulación contra el promedio experimental.

Condiciones operativas. La velocidad de rotación de las aspas es una de las principales variables operativas en la molienda a escala piloto e industrial (Cotabarren et al., 2020). El molino escala laboratorio utilizado no permitió manipular esta variable; no obstante, su estudio en DEM permite analizar la sensibilidad del modelo frente a estos cambios, y así validar su potencial capacidad de simulación a escala piloto como trabajo

a futuro. Se tomó como base el caso de malla 4 mm y caudal 200 g/min. Se comparó la velocidad experimental de 10.000 rpm frente a 14.000, 5.000 y 1.000 rpm.

Propiedades del material. Los materiales en DEM se definen a partir de sus micro propiedades físicas y mecánicas (Coetzee, 2020). Dado que el molino de martillos opera por compresión e impacto, se decidió estudiar el efecto del módulo de Young (Y), y de los coeficientes de restitución (ϵ) y fricción (μ) del maíz para consigo mismo y para con las superficies metálicas que componen el equipo.

El módulo de Young es una propiedad inherente a la estructura cristalina de los materiales, que determina su capacidad de deformación elástica. Los valores recomendados por la literatura para este parámetro son de entre 500 y 1.000 MPa para simulaciones de molienda (Jha et al., 2021). Se estudió el efecto sobre la PSD y el consumo de potencia para un Y de 16,914 MPa, que fue el primer valor determinado experimentalmente para el maíz (Chiaravalle et al., 2023), y tanto para 500 como 1.000 MPa. El caso de estudio fue una simulación de malla 4 mm y caudal 200 g/min.

El coeficiente de fricción determina la resistencia al deslizamiento de un cuerpo sobre otro en un contacto (Barrios et al., 2013), mientras que el coeficiente de restitución refleja la conservación de la energía cinética luego de una colisión (Hlosta et al., 2018). Sus valores van entre 0 y 1. El coeficiente de fricción intergranular (maíz-maíz, μ_p) y el coeficiente de fricción partícula-entorno (maíz-metal, μ_w), así como el coeficiente de restitución intergranular (ϵ_p) y el coeficiente de restitución partícula-entorno (ϵ_w), fueron determinados y validados mediante una combinación de ensayos experimentales ad-hoc y calibración en DEM (Chiaravalle et al., 2023). Para el análisis de sensibilidad, se cambiaron los cuatro valores en simultáneo, incrementándolos en un 50 y 100%, respectivamente, en una simulación de malla 4 mm y caudal 100 g/min. El conjunto de valores utilizados se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores para μ_p , μ_w , ϵ_p y ϵ_w .

Parámetro	μ_p	μ_w	ϵ_p	ϵ_w
Valor experimental	0,310	0,424	0,240	0,439
Valor + 50%	0,465	0,636	0,360	0,659
Valor + 100%	0,620	0,848	0,480	0,878

Parámetros de rotura. Se seleccionaron el coeficiente de acumulación de daño γ y el mínimo tamaño absoluto admisible para los fragmentos (d_{min}).

γ es un parámetro que cuantifica la capacidad de un material a soportar daño impacto tras impacto, antes de una rotura (Tavares, 2022, 2009). La microestructura de los materiales afecta su valor, que va desde 1,5 para materiales con estructuras complejas, como monocristales, hasta 8,1 para materiales con una pobre cohesión intergranular (Tavares, 2022). La calibración experimental de γ para el maíz resultó en un valor de 1,8 (Chiaravalle et al., 2025). Con el objetivo de estudiar su efecto en la molienda, en el cual los fragmentos se enfrentan a un gran número de impactos por segundo, se lo incrementó hasta 3,5, 5 y 8 para una simulación de malla 4 mm y caudal 100 g/min.

El d_{min} determina el mínimo tamaño que puede alcanzar un fragmento en una simulación, utilizándose para disminuir el coste computacional. El valor elegido fue de 149 μm , correspondiente con la apertura del último tamiz ASTM que retuvo una cantidad significativa de maíz en los ensayos experimentales de molienda (Chiaravalle et al., 2025). Se analizó el efecto de incrementar el d_{min} a 210, 350 y 500 μm en una simulación de 4 mm 100 g/min.

4 Resultados y discusión

Para cada variable estudiada, se presenta el gráfico de las PSD de molienda DEM junto con la PSD experimental de la configuración malla-caudal correspondiente. En cada gráfico se exponen los valores de las propiedades que no fueron modificadas para cada conjunto de simulaciones. Los tamaños característicos y r^2 de las PSD, junto con la potencia consumida promedio, se presentan en una tabla para cada variable.

4.1 Condiciones operativas

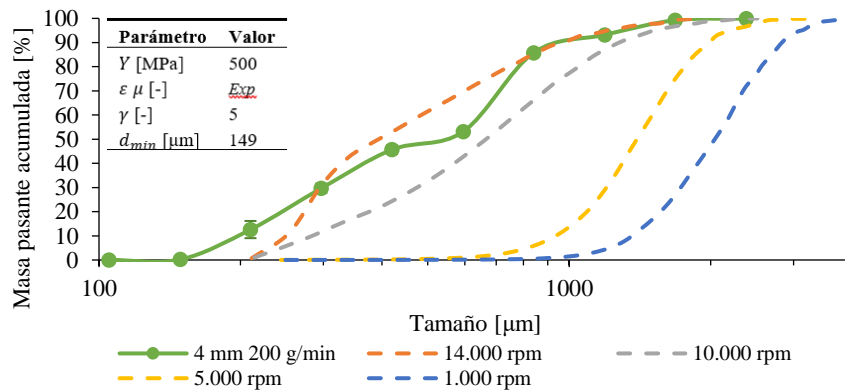


Fig. 2. PSD del análisis de la velocidad de rotación de las aspas.

Tabla 2. Potencia promedio, d_{10} , d_{50} y d_{90} , y coeficiente r^2 para el análisis de la velocidad de rotación de las aspas.

	Experimental		DEM		
	4 mm 200 g/min	14.000 rpm	10.000 rpm	5.000 rpm	1.000 rpm
Potencia [W]	52,61 ± 17,08	42,14 ± 21,68	32,73 ± 14,74	24,75 ± 10,40	4,13 ± 2,38
d_{10} [μm]	197,21	248,92	284,50	934,65	1359,17
d_{50} [μm]	521,56	394,02	665,90	1395,14	2041,20
d_{90} [μm]	1038,99	967,95	1276,84	1984,74	2838,75
r^2 de la PSD [-]		0,977	0,957	0,541	0,343

En la Fig. 2 se observa cómo las PSDs se corren a tamaños mayores a medida que disminuye la velocidad de rotación de las aspas. La apertura de la malla (4 mm) es aproximadamente la mitad del tamaño promedio de las partículas originales, por lo que la probabilidad de que un fragmento salga de la cámara de molienda es alta para esta malla (Hajratwala, 1982), aún cuando no se halla roto completamente. A bajas velocidades, la probabilidad de recibir impactos de los martillos de las aspas es menor, incrementando el tamaño que poseen los fragmentos del producto de la molienda. Esto se evidencia al observar el crecimiento en los tamaños característicos a medida que se reduce la velocidad, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Como es de esperar, el valor de r^2 de la PSD disminuye significativamente con la disminución de la velocidad de rotación, debido a que las bajas velocidades no representan al ensayo experimental. A su vez, la potencia promedio alcanzada decrece en una proporción similar. Para la velocidad de 14.000 rpm, el r^2 mejora por predecir adecuadamente los tamaños superiores de la PSD.

4.2 Propiedades del material

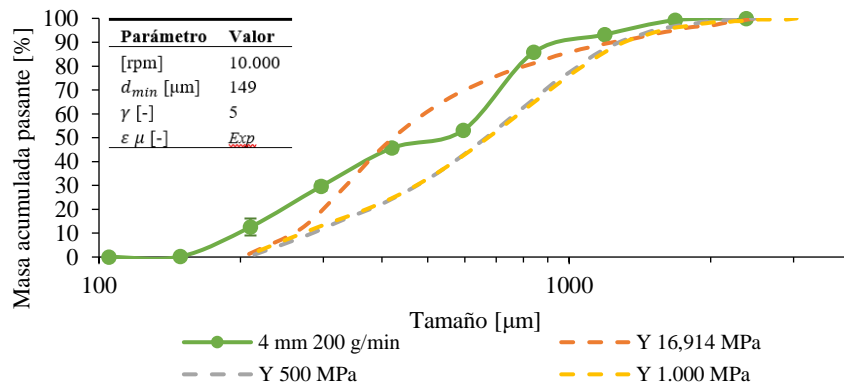


Fig. 3. PSD del análisis del módulo de Young.

Tabla 3. Potencia promedio, d_{10} , d_{50} y d_{90} , y coeficiente r^2 para el análisis del módulo de Young.

	Experimental		DEM	
	4 mm 200 g/min	Y 16,914 MPa	Y 500 MPa	Y 1.000 MPa
Potencia [W]	52,61 ± 17,08	4,00 ± 1,99	32,73 ± 14,74	38,68 ± 21,04
d_{10} [µm]	197,21	258,28	284,50	273,30
d_{50} [µm]	521,56	425,20	665,90	672,22
d_{90} [µm]	1038,99	1238,94	1276,84	1307,80
r^2 de la PSD [-]		0,969	0,957	0,956

La Fig. 3 y Tabla 3 muestran el análisis de Y . Puede verse como los valores de 500 y 1.000 MPa dan como resultado la misma PSD. La diferencia en los tamaños característicos y en el r^2 es insignificante, y está dada por la aleatoriedad propia de las simulaciones de sistemas de partículas, sin guardar relación con el cambio en Y . El módulo de 16,914 MPa presenta una PSD corrida para valores pequeños; una pobre capacidad elástica en las partículas conduce a una mayor rotura de éstas. La potencia consumida para 16,914 MPa carece de sentido físico, lo que conduce a descartar este valor de Y para futuras simulaciones de molienda. La potencia consumida para 500 MPa es menor que para 1.000 MPa, sin embargo, esta última no alcanza el promedio experimental. El r^2 de la PSD de 16,914 MPa es ligeramente superior al alcanzado para 500 y 1.000 MPa, lo que indica que, si bien debe conservarse alguno de estos dos valores para Y , se debe ajustar algún otro parámetro para obtener una PSD más cercana a la experimental.

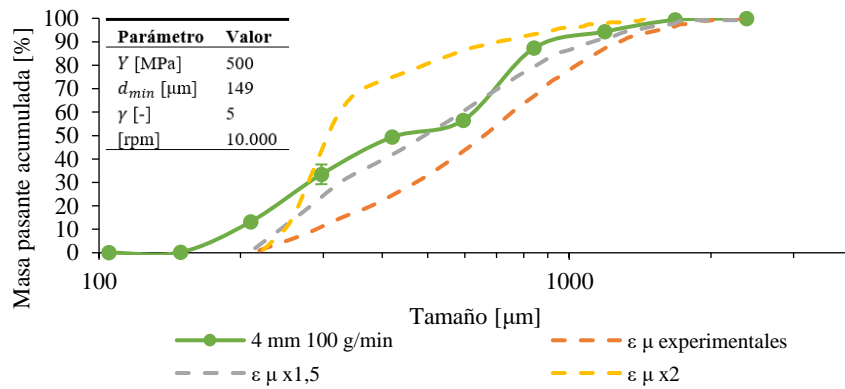


Fig. 4. PSD del análisis de los coeficientes de restitución y fricción.

Tabla 4. Potencia promedio, d_{10} , d_{50} y d_{90} , y coeficiente r^2 para el análisis de los coeficientes de restitución y fricción.

	Experimental	DEM		
	4 mm 100 g/min	$\epsilon \mu \text{ exp}$	$\epsilon \mu \times 1,5$	$\epsilon \mu \times 2$
Potencia [W]	35,13 ± 5,28	24,85 ± 7,78	28,91 ± 16,02	43,05 ± 20,00
d_{10} [μm]	194,98	289,51	244,31	246,76
d_{50} [μm]	436,08	658,97	491,92	307,59
d_{90} [μm]	974,99	1276,16	1119,93	705,99
r^2 de la PSD [-]		0,944	0,985	0,932

Los resultados del análisis de ϵ y μ se muestran en la Fig. 4 y Tabla 4. El incremento en estos parámetros conduce a PSD más finas, lo que se evidencia en los tamaños característicos cada vez menores a los que llegan, y en un mayor consumo de potencia.

Altos valores para los coeficientes de fricción conducen a una mayor disipación de energía en esfuerzos tangenciales en los contactos partícula-partícula o partícula-superficies del molino, resistiendo el movimiento y, consecuentemente, dando trayectorias más complejas. Esto incrementa su tiempo de residencia en la cámara de molienda, aumentando su probabilidad de experimentar impactos, lo que da como resultado una mayor reducción de tamaño. Por su parte, aumentar el valor de los coeficientes de restitución conduce a una mayor elasticidad de las colisiones. Las partículas conservan mayor energía cinética entre impactos, lo que hace que $E_{k,b}$ de la Eq. (6) se incremente, aumentando el valor del t_{10} . Debido a esto, la PSD crece de manera más abrupta.

En Rocky DEM, el consumo de potencia se mide en función de los contactos entre las aspas y las partículas. Una mayor fricción hace que las aspas deban superar una mayor resistencia en los contactos, incrementando la potencia que deben consumir para continuar su movimiento. A su vez, la alta restitución da un mayor número de colisiones de carácter elástico, con fragmentos que se mueven a velocidades más altas, incrementando aún más la potencia total.

La PSD alcanzada para los parámetros elevados en un 50% posee un mejor r^2 que aquella para los parámetros sin modificación. La potencia promedio crece ligeramente para este caso con respecto al original, acercándose más al promedio experimental, mientras que la potencia predicha para los parámetros elevados en un 100% es superior a la del ensayo. Esto sugiere que una modificación en estos parámetros, conservando un Y de 500 o 1.000 MPa, puede conducir a una predicción más acertada de la fenomenología de la molienda de maíz en DEM.

4.3 Parámetros de rotura

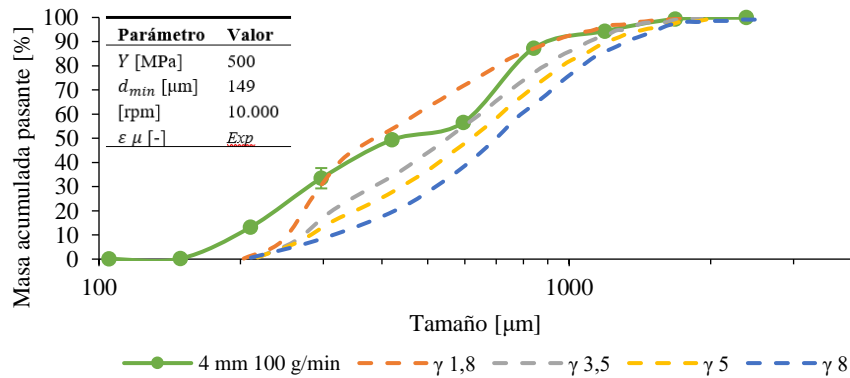


Fig. 5. PSD del análisis del coeficiente de acumulación de daño.

Tabla 5. Potencia promedio, d_{10} , d_{50} y d_{90} , y coeficiente r^2 para el análisis del coeficiente de acumulación de daño.

	Experimental		DEM		
	4 mm 100 g/min	γ 1,8	γ 3,5	γ 5	γ 8
Potencia [W]	35,13 ± 5,28	18,45 ± 7,74	23,33 ± 8,67	23,55 ± 9,78	24,99 ± 9,60
d_{10} [μm]	194,98	250,45	271,29	281,85	314,92
d_{50} [μm]	436,08	386,91	551,82	619,60	699,55
d_{90} [μm]	974,99	916,74	1102,82	1206,56	1322,09
r^2 de la PSD [-]		0,981	0,973	0,957	0,925

La Fig. 5 y Tabla 5 muestran los resultados del análisis del parámetro γ de la Eq. (5). Incrementar su valor conduce a incrementos en la PSD, dando crecimientos menos abruptos. Todos los tamaños característicos crecen proporcionalmente. Sin embargo, a diferencia de lo observado en el análisis de ϵ y μ , y del mismo modo que lo observado para el análisis de Y , las PSD más gruesas son las que consumen más potencia. Si bien este incremento es de baja proporción, a γ grande las partículas experimentan un mayor número de impactos hasta llegar a la fragmentación, requiriendo más acumulación de energía y conduciendo a un incremento en el número de impactos sin rotura. DEM registra la potencia en función de la cantidad de impactos, independientemente de si condujeron a la fragmentación del material o no. El valor de γ calibrado experimentalmente de 1,8 da la PSD con el mejor r^2 , pero predice una potencia bastante menor que la experimental, lo que indica que se debe ajustar algún otro parámetro para simular la molienda de maíz más eficazmente. Nuevamente, aumentar los valores de ϵ y μ puede dar mejores resultados.

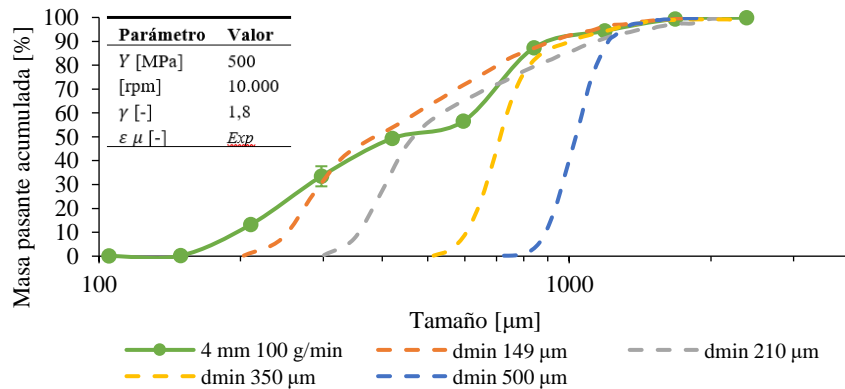


Fig. 6. PSD del análisis del tamaño mínimo admisible para fragmentos.

Tabla 6. Potencia promedio, d_{10} , d_{50} y d_{90} , y coeficiente r^2 para el análisis del tamaño mínimo admisible para fragmentos.

	Experimental	DEM			
	4 mm 100 g/min	d_{min} 149 μm	d_{min} 210 μm	d_{min} 350 μm	d_{min} 500 μm
Potencia [W]	35,13 \pm 5,28	18,45 \pm 7,74	23,67 \pm 9,83	33,56 \pm 9,65	37,96 \pm 17,68
d_{10} [μm]	194,98	250,45	355,42	604,25	890,01
d_{50} [μm]	436,08	386,91	469,97	713,74	1032,42
d_{90} [μm]	974,99	916,74	1140,15	1006,03	1211,96
r^2 de la PSD [-]		0,981	0,938	0,819	0,594

El análisis del d_{min} se presenta en la Fig. 6 y Tabla 6. Puede verse como las PSD se ven limitadas a comenzar a crecer en tamaños cada vez mayores, reduciendo su dispersión. El d_{90} crece en una menor proporción en comparación al d_{10} y d_{50} , dado que los demás parámetros que gobiernan el proceso se han mantenido constantes. Como es de esperar, el r^2 decrece significativamente al no utilizar el d_{min} de 149 μm que surgió de los ensayos experimentales. La potencia consumida se incrementa significativamente a medida que aumenta el d_{min} , dado que, al estar limitados a tamaños más grandes, aumenta la probabilidad de recibir impactos antes de poder salir de la cámara de molienda por los orificios de la malla.

En cuanto al tiempo insumido en la simulación, las configuraciones de 149, 210, 350 y 500 μm se completaron en 3,06, 2,67, 1,41 y 0,21 días, respectivamente. Reducir el d_{min} aún más que 149 μm podría dar una PSD más precisa, pero el tiempo de cómputos se volvería demasiado elevado para completar los casos de simulación a caudales más altos o tamaños de malla más pequeños.

5 Conclusiones

El modelo fue capaz de responder satisfactoriamente a los cambios en sus variables experimentales y a los parámetros y propiedades del material. Para lograr la futura simulación de un equipo a escala piloto es necesario alcanzar una correcta predicción de los resultados experimentales. El valor óptimo para el módulo de Young del maíz se encontró entre los recomendados por la literatura. El parámetro de acumulación de daño y el mínimo tamaño admisible para los fragmentos, determinados en función de los ensayos, condujeron a las mejores predicciones de potencia y PSD de fragmentos. Por su parte, los resultados evidencian que los coeficientes de fricción y restitución poseen una influencia significativa en la molienda, con lo cual debe prestarse especial cuidado en su calibración.

Declaración de intereses. Los autores no tienen intereses en competencia que declarar que sean relevantes para el contenido de este artículo.

Referencias

- André, F.P., Tavares, L.M., 2020. Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles. *Powder Technol.* 372, 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.016>
- Bao, M., Wu, W., Tian, G., Qiu, B., 2025. Particology Research on discrete element parameter calibration of ore particles based on Tavares breakage model in a SAG mill 96.
- Barrios, G.K.P., de Carvalho, R.M., Kwade, A., Tavares, L.M., 2013. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling. *Powder Technol.* 248, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.063>
- Chen, F., Yuan, H., Liu, Z., Zhou, L., Cao, C., Zhong, G., Zhang, D., Zhao, Y., 2025. DEM simulation of an impact crusher using the fast-cutting breakage model 450.
- Chen, Z., Wassgren, C., Ambrose, K., 2020a. Measurements of grain kernel friction coefficients using a reciprocating-pin tribometer. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 63, 675–685. <https://doi.org/10.13031/trans.13748>
- Chen, Z., Wassgren, C., Ambrose, R.P.K., 2022. Development and validation of a DEM model for predicting impact damage of maize kernels. *Biosyst. Eng.* 224, 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.09.012>
- Chen, Z., Wassgren, C., Ambrose, R.P.K., 2021. Measured damage resistance of corn and wheat kernels to compression, friction, and repeated impacts. *Powder Technol.* 380, 638–648. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.012>
- Chen, Z., Wassgren, C., Veikle, E., Ambrose, K., 2020b. Determination of material and interaction properties of maize and wheat kernels for DEM simulation. *Biosyst. Eng.* 195, 208–226. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.007>
- Chiaravalle, A.G., Cotabarren, I.M., Piña, J., 2025. DEM simulation of maize milling in a hammer mill. *Powder Technol.* 457. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120892>
- Chiaravalle, A.G., Cotabarren, I.M., Piña, J., 2024. Simulación de molienda de maíz bajo el método de elementos discretos. *Jornadas Argentinas Informática e Investig. Oper.*
- Chiaravalle, A.G., Cotabarren, I.M., Piña, J., 2023. DEM breakage calibration for single particle fracture of maize kernels under a particle. *Chem. Eng. Res. Des.* 195, 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.05.015>
- Coetzee, C., 2020. Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles. *Powder Technol.* 364, 851–878. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.076>
- Cotabarren, I., Fernández, M.P., Di Battista, A., Piña, J., 2020. Modeling of maize breakage in hammer mills of different scales through a population balance approach. *Powder Technol.* 375, 433–444. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.016>
- Dey, S.K., Dey, S., Das, A., 2013. Comminution features in an impact hammer mill. *Powder Technol.* 235, 914–920. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.003>
- Doroszuk, B., Król, R., 2022. Industry Scale Optimization: Hammer Crusher and DEM Simulations. *Minerals* 12, 244–253. <https://doi.org/10.3390/min12020244>
- Hajratwala, B.R., 1982. Particle Size Reduction by a Hammer Mill I: Effect of Output Screen Size, Feed Particle Size, and Mill Speed. *J. Pharm. Sci.* 71, 188–190. <https://doi.org/doi.org/10.1002/jps.2600710212>
- Hlosta, J., Žurovec, D., Rozbroj, J., Ramírez-Gómez, Á., Nečas, J., Zegzulka, J., 2018.

- Experimental determination of particle–particle restitution coefficient via double pendulum method. *Chem. Eng. Res. Des.* 135, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.016>
- Hu, L., Zhu, H., Hua, J., 2021. DEM simulation of energy transitions in a hammer mill: Effect of impeller configurations, agitation speed, and fill level. *Powder Technol.* 394, 1077–1093. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.090>
- Jha, P.K., Desai, P.S., Bhattacharya, D., Lipton, R., 2021. Peridynamics-based discrete element method (PeriDEM) model of granular systems involving breakage of arbitrarily shaped particles. *J. Mech. Phys. Solids* 151. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104376>
- Nghipulile, T., Bwalya, M.M., Govender, I., Simonsen, H., 2024. Discrete Element Modeling of the Breakage of Single Polyhedral Particles in the Rotary Offset Crusher.
- Shi, L., Li, W., Sun, J., Qiu, Y., Wei, X., Luan, G., Hu, Y., Tatsumi, E., 2016. Grinding of maize : The effects of fine grinding on compositional , functional and physicochemical properties of maize flour. *J. Cereal Sci.* 68, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.11.004>
- Tavares, L.M., 2022. Review and Further Validation of a Practical Single-Particle Breakage Model. *KONA Powder Part. J.* <https://doi.org/10.14356/kona.2022012>
- Tavares, L.M., 2009. Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation. *Powder Technol.* 190, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.011>
- Tavares, L.M., André, F.P., Potapov, A., Maliska, C., 2020. Adapting a breakage model to discrete elements using polyhedral particles. *Powder Technol.* 362, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.007>
- Tavares, L.M., King, R.P., 2002. Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics. *Powder Technol.* 123, 138–146. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00438-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00438-7)
- Tavares, L.M., King, R.P., 1998. Single-particle fracture under impact loading. *Int. J. Miner. Process.* 54, 1–28. [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(98\)00005-2](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(98)00005-2)
- Thomas, M., Hendriks, W.H., van der Poel, A.F.B., 2018. Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding. *Anim. Feed Sci. Technol.* 240, 11–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.03.010>