

## MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA TASA Y EL PATRÓN DE DESGASTE ABRASIVO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

Franco Perazzo<sup>a</sup>, Frederik Knop<sup>a</sup>, Patricio Mascaró<sup>a</sup> y Gerardo Placencia<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Aula DIMEC-CIMNE, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile, franco.perazzo@usm.cl,  
<http://www.mecanica.utfsm.cl>

**Palabras clave:** desgaste abrasivo, método de elementos discretos, perfil de desgaste.

**Resumen.** El método de elementos discretos (MED), es un método computacional utilizado para describir el movimiento de un gran número de partículas de distintos tamaños y formas, que interactúan mediante un modelo de contacto. Entre otras aplicaciones, el MED se utiliza como una forma efectiva de abordar problemas de ingeniería para modelar el comportamiento de materiales granulares, mecánica del polvo y rocas principalmente. En el ámbito de la minería, el MED se ha utilizado mayoritariamente en predicción de la trayectoria del material al interior de molinos SAG y en chutes de traspaso de mineral. Dentro de las aplicaciones de interés en este rubro, está también la modelación del desgaste. Existen muchos procesos donde el desgaste limita fuertemente la vida útil de los equipos, afectando su productividad y costos de operación. Contar con una herramienta numérica para predecir el desgaste, permitiría reducir los costos en la etapa de diseño y operación de equipos mineros, buscando configuraciones apropiadas para las condiciones reales de trabajo.

En el presente trabajo se implementa el MED para modelar el desgaste abrasivo en placas de acero que interactúan con sólidos a granel, como el mineral de cobre chancado. Se utilizó el modelo de Archard para predecir la tasa y el patrón de desgaste en una placa de acero estructural A37-24 ES bajo distintas condiciones de granulometría del mineral de cobre. Una de las etapas claves consiste en la correcta caracterización del medio granular para poder calibrar el modelo numérico.

Los resultados numéricos que se obtienen se comparan favorablemente con los valores experimentales, lo que permite establecer que el modelo es capaz de predecir correctamente el fenómeno del desgaste abrasivo.

## 1 INTRODUCCIÓN

El método de elementos discretos (MED) o discrete element method (DEM) (Cundall and Strack, 1979; Cundall, 1988; Luding, 2008) es un método computacional utilizado para describir el movimiento de un gran número de partículas de distintos tamaños y formas, cuya interacción entre partículas y con el medio se representa con un modelo de contacto. En la mayoría de las simulaciones mediante el MED, se consideran partículas con tamaños del orden de los milímetros y cantidades del orden de unos cuantos miles para lograr resultados en tiempos de cómputo razonable (Marigo and Stitt, 2015). Mientras que en las aplicaciones industriales muchas veces es necesario simular millones de partículas para poder representar un proceso. Sin embargo, con los avances del poder de procesamiento de los computadores y la optimización de algoritmos, es posible simular millones de partículas con geometrías complejas, utilizando procesamiento en paralelo en GPU (graphics processor unit), ver como ejemplo Govender et al. (2016). Hoy en día el MED se utiliza como una forma efectiva de abordar problemas de ingeniería para modelar el comportamiento de materiales granulares y discontinuos en flujos granulares, mecánica del polvo y rocas principalmente (Oñate et al., 2005; Estay and Chiang, 2013). También, en el ámbito de la minería, el MED se ha utilizado mayoritariamente en predicción de la trayectoria del material al interior de los molinos SAG y en chutes de traspaso de mineral (Cleary, 2001; Kessler and Prenne, 2009). Dentro de las aplicaciones de interés en este rubro, está la modelación del desgaste. Existen muchos procesos donde el desgaste limita fuertemente la vida útil de los equipos, afectando su productividad y costos de operación. Contar con una herramienta numérica para predecir el desgaste, permite reducir los costos de prototipos como de experimentación y así maximizar la vida útil de los equipos. En base a esta necesidad, en el presente trabajo se busca implementar un código DEM para modelar el desgaste abrasivo en elementos de máquina que interactúan con sólidos a granel, como el mineral de cobre chancado. En particular el modelo debe ser capaz de calcular la pérdida de material de la pieza sometida a desgaste, para lo cual se utiliza el modelo de desgaste de Archard (Archard, 1953; Bhushan, 2001), donde se puede obtener la tasa y patrón de desgaste de las superficies dañadas de la pieza sometida a desgaste.

Para implementar el modelo de desgaste en un código MED y modelar la pérdida de material de la pieza a partir de la información del modelo de Archard, es necesario especificar la información que se desea visualizar del patrón de desgaste, siendo necesario desarrollar un código MED propio que otorga la flexibilidad necesaria para este tipo de aplicación en específico. En la validación del modelo numérico, en una primera etapa, se desarrolla una metodología en base ensayos específicos para caracterizar el mineral, como un material granular con partículas esféricas y compuestas, donde esta última corresponde a una representación de partículas esféricas aglomeradas en la modelación. Luego se implementa y simula el experimento de la rueda de desgaste (Erazo, 2013) mediante MED. Al comparar los resultados de la tasa y patrón de desgaste de la simulación con los del experimento real, es posible validar el modelo numérico y justificar la implementación de partículas compuestas.

## 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO NUMÉRICO

El método de elementos discretos se implementa como un algoritmo cíclico, donde se aplican las leyes de movimiento de cada partícula, una ley de fuerza-desplazamiento en cada contacto, y una actualización constante de posiciones. Utilizando el algoritmo de búsqueda de partículas y paredes vecinas de Verlet (Muth et al.) se desarrolló un algoritmo, mediante el uso de elementos de superficie y bordes del enmallado superficial, para representar piezas en el espacio de trabajo y poder calcular los contactos.

A partir del conocimiento de la posición y velocidad de las partículas, se actualizan los contactos de diferentes partículas y se aplica el modelo de contacto de Hertz (Hu et al., 2011) modificado para determinar las fuerzas de reacción. El modelo de desgaste de Archard (Archard, 1953) toma información de las velocidades y fuerzas para predecir la pérdida de volumen asociado al desgaste abrasivo sobre el elemento de máquina. Con la información de las fuerzas y torques, se calculan las nuevas velocidades y posiciones usando un método directo de integración temporal. A continuación, en la Figura 1, se detalla el orden para el funcionamiento del algoritmo cíclico expuesto.

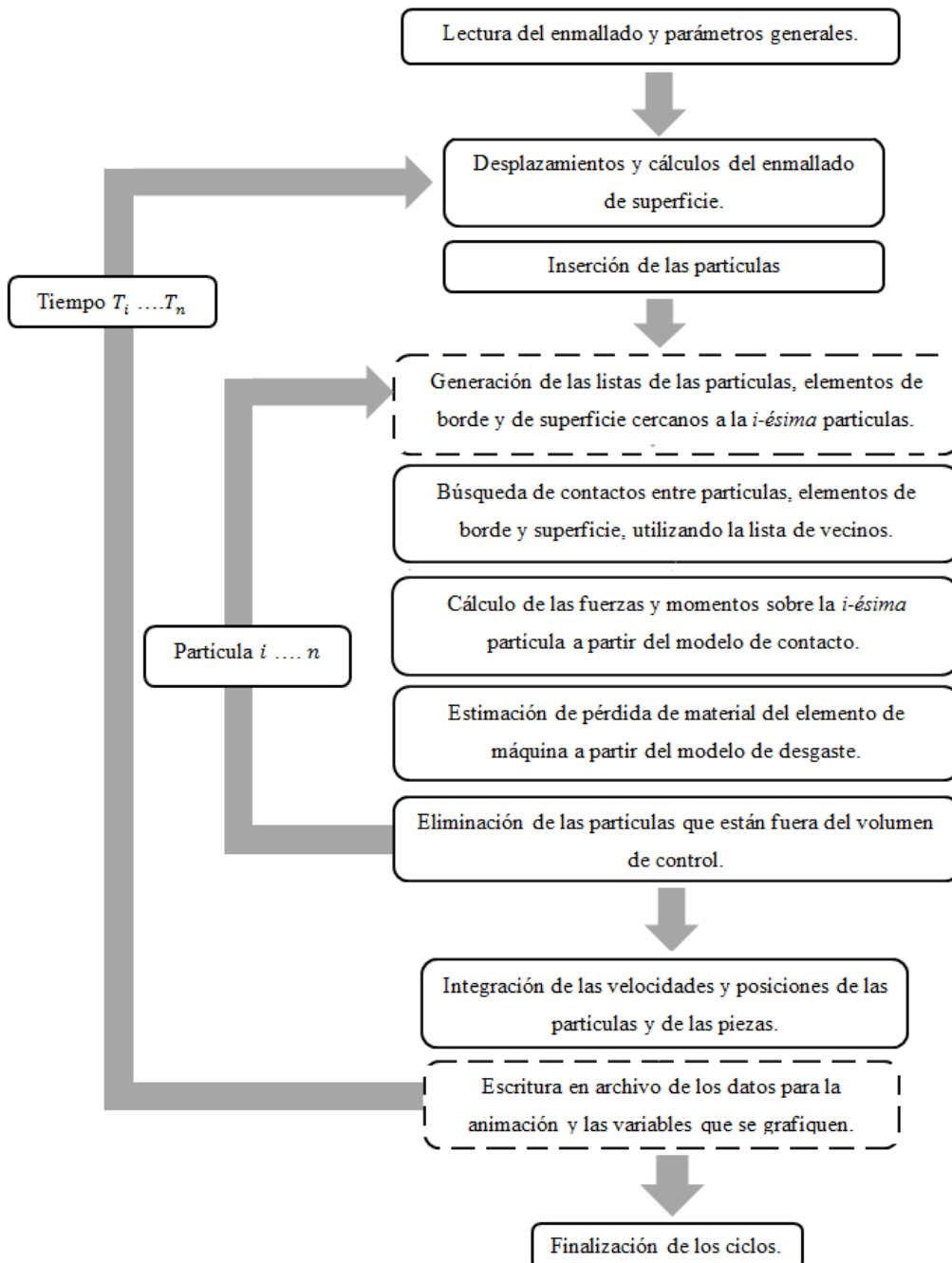


Figura 1: Diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo cíclico

## 2.1 Modelo de contacto y conformación de partículas

El modelo de contacto utilizado está basado en el modelo no lineal de Hertz, propuesto por Hu et al., (2011), donde se considera el efecto del aumento del área de contacto de las partículas en las fuerzas viscosas y elásticas. En la Figura 2 se representan las fuerzas elásticas como un resorte, las fuerzas viscosas como un pistón y la fuerza de fricción como dos elementos que rozan.

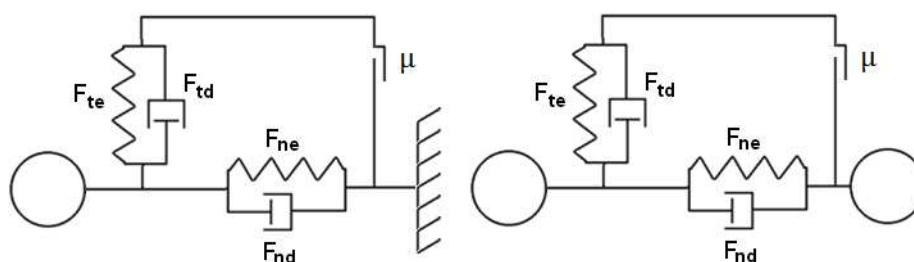


Figura 2: Esquema del modelo de contacto viscoso entre una partícula y una pared, y entre dos partículas, representado por resortes y pistones

La componente normal  $F_n$  de la fuerza de contacto resultante  $F$ , está constituida por la fuerza normal elástica  $F_{ne}$  y la fuerza normal viscosa  $F_{nd}$ . Análogamente la componente tangencial  $F_t$  de la fuerza  $F$ , está compuesta por la fuerza tangencial elástica  $F_{te}$  y la fuerza tangencial viscosa  $F_{td}$ , como se muestra en la ecuación (1).

$$F = F_n + F_t = (F_{ne} + F_{nd}) + (F_{te} + F_{td}) \quad (1)$$

Para los contactos del tipo partícula-partícula y superficie-partículas, la fuerza tangencial  $F_t$  está limitada por la fuerza de fricción. Adicionalmente se incorpora la fuerza de resistencia a la rodadura  $F_{rod}$  para simular la fuerza de arrastre del mineral irregular mientras rueda. El material granular se representó por medio de partículas esféricas y partículas compuestas que pueden representar mejor la dinámica de partículas con geometrías irregulares (Hu et al., 2011; Johnstone, 2010). Las posibles configuraciones que se programaron se muestran en la Figura 3.

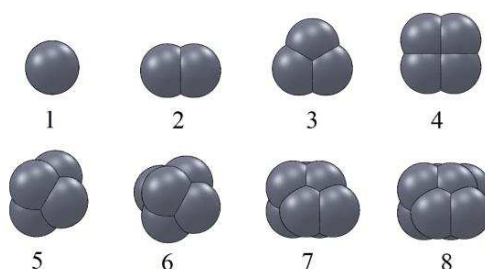


Figura 3: Esquema de las partículas compuestas con distinto número de elementos

Como variable extra se utiliza el factor de inferencia o factor de forma  $F_i$ , que es un multiplicador de la distancia entre centros de los elementos que componen la partícula compuesta, ver Figura 4. La interferencia de las partículas se logra incorporando una fuerza cohesiva que contrarresta la fuerza generada a partir del modelo de contacto utilizado. Además, se implementó un modelo de fuerzas de torsión sobre los elementos de las partículas compuestas para asegurar los giros solidarios de las partículas en los contactos.

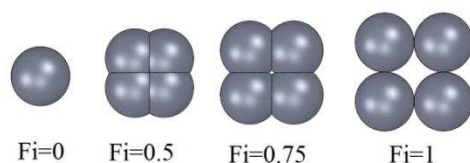


Figura 4: Variación del coeficiente  $F_i$  en una partícula compuesta de 4 elementos

## 2.2 Representación del desgaste

Para predecir la pérdida de volumen asociado al desgaste, se utiliza la formulación de desgaste de Archard (Archard, 1953), donde el desgaste lineal  $W$  es proporcional a la fuerza normal  $F_n$  y la tasa de desgaste  $K$ , como se muestra en la ecuación (2).

$$W = K F_n \quad (2)$$

Un aporte original del presente trabajo corresponde a la metodología propuesta para deformar la superficie del cuerpo a desgastar, a partir de la información de la ley de Archard (ec.2), lo que permite obtener una representación visual de la pérdida de volumen asociada al desgaste. La representación visual de esta pérdida de volumen, por lo tanto, se efectúa deformando la malla superficial del elemento sometido al desgaste abrasivo. Teniendo la información de la pérdida de volumen asociada a cada elemento de superficie, se procede a calcular el desplazamiento de los nodos pertenecientes a esta cara. Para cada paso de tiempo  $h$ , el diferencial de pérdida de volumen en cada cara de los elementos de superficie ( $\Delta V_{cara}$ ), se expresa mediante la ecuación 3. Con  $h$  como el paso de tiempo empleado en la simulación y  $\dot{\delta}t$  como la velocidad de deslizamiento tangencial.

$$\Delta V_{cara} = \int_t^{t+h} K F_n |\dot{\delta}t| dt \approx K F_n |\dot{\delta}t| h \quad (3)$$

A su vez, el desplazamiento diferencial  $\Delta d_{cara}$  de cada elemento de superficie, depende del área del elemento de superficie  $A_{cara}$ , del vector normal del elemento de superficie  $\hat{n}$  y de la pérdida de volumen  $\Delta V_{cara}$  como se muestra en la ecuación (4).

$$\Delta d_{cara} = \frac{\Delta V_{cara}}{A_{cara}} \quad ; \quad d_{cara} = d_{cara} + \Delta d_{cara} \hat{n} \quad (4)$$

El área del elemento de superficie  $A_{cara}$  se calcula mediante la ecuación (5) como la mitad de la norma del producto cruz de dos aristas arbitrarias del elemento de superficie, con  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  como los nodos o vértices del elemento triangular.

$$A_{cara} = \frac{|(p_1 - p_2) \times (p_1 - p_3)|}{2} \quad (5)$$

La deformación superficial del elemento sometido a desgaste se calcula como un desplazamiento de los 3 nodos del elemento de acuerdo con la ecuación (6).

$$p_k^{t+1} = p_k^t + \Delta d_{cara} \hat{n} \quad ; \text{ para } k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

Al interconectar los nodos en común de las caras del enmallado, se logra obtener continuidad en la deformación de la superficie, generando un patrón de desgaste suavizado. En la Figura 5 se muestra la secuencia en que actúa el algoritmo cuando una partícula genera desgaste sobre un elemento de superficie.

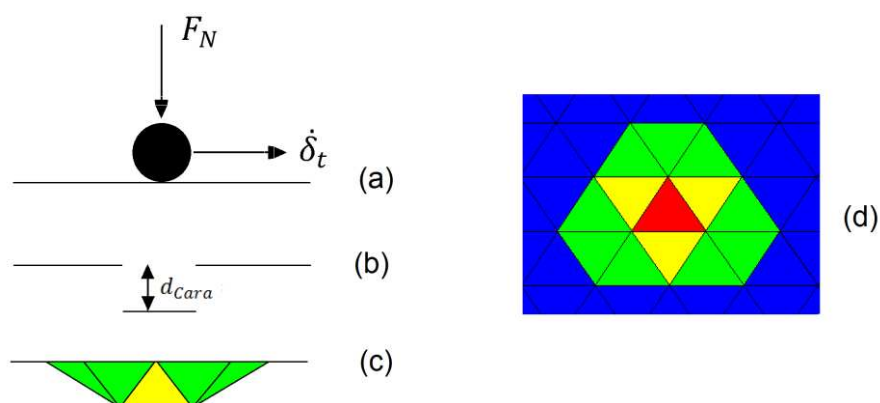


Figura 5: (a) Partícula contactando sobre una superficie. (b) Desplazamiento del elemento de malla. (c) Interconexión de nodos. (d) Vista superior del desgaste

Para calcular el desgaste acumulado  $V_{cara}$  sobre el elemento de superficie, primero se calcula  $P_c$  que es el punto medio de los tres vértices del elemento de superficie (ecuación (7)).

$$P_c = \frac{(P_1 + P_2 + P_3)}{3} \quad (7)$$

En la ecuación (8) el desgaste acumulado  $V_{cara}$  integra las variaciones asociadas al desgaste de los centros de los elementos de superficie, permitiendo calcular la pérdida de volumen de la pieza, a pesar de ésta pueda estar en movimiento.

$$V_{cara} = V_{cara} + (|P_c^{t+1} - P_c^t| A_{cara}) \quad (8)$$

Para calcular la pérdida total de volumen  $V$ , se suman todos los desgastes de los elementos de superficie de la pieza a desgastar (ecuación (9)). Al multiplicar  $V$  por la densidad del material desgastado, se obtiene la masa removida.

$$V = \sum V_{cara} \quad (9)$$

Esta metodología para representar el desgaste, es válida para deformaciones pequeñas con un enmallado de superficie con elementos triangulares de tamaño uniforme en la zona a desgastar. De no cumplirse esta última condición, un pequeño elemento de superficie podría distorsionar un elemento de superficie de mayor tamaño, exacerbando la medición de pérdida de material en la simulación. Para evitar este problema en deformaciones grandes, es necesario considerar el área de todos los elementos adyacentes, al momento de calcular los desplazamientos de los nodos. En este caso, se busca modelar deformaciones pequeñas, por lo se asegurará que el tamaño del elemento de superficie sea uniforme en la zona de desgaste.

Es posible calcular la profundidad de desgaste  $h_{cara}$  a partir del cociente entre  $V_{cara}$  y  $A_{cara}$ , que aproxima el desplazamiento del punto medio del elemento de superficie asociado al desgaste. La variable  $h_{cara}$  considera las deformaciones directas  $d_{cara}$  y las deformaciones provenientes de los elementos de superficie adyacentes que comparten nodos en común.

Para tener un patrón de desgaste comparable con los de un ensayo real, es necesario tener información de los impactos y ralladuras que genera el sólido a granel sobre la superficie a desgastar. En base a esta necesidad se propone utilizar la variable impacto  $I_{cara}$ , que es la magnitud del vector  $d_{cara}$  del elemento de superficie. En la ecuación (10) se muestra la formulación para calcular  $h_{cara}$  e  $I_{cara}$ .

$$h_{cara} = \frac{V_{cara}}{A_{cara}} \quad ; \quad I_{cara} = |d_{cara}| \quad (10)$$

En la Figura 6 se muestran los patrones de desgaste generados en una simulación de una placa que ha sido desgastada con partículas abrasivas. Se contrasta el patrón de desgaste generado con las variables  $h_{Cara}$  e  $I_{Cara}$ .

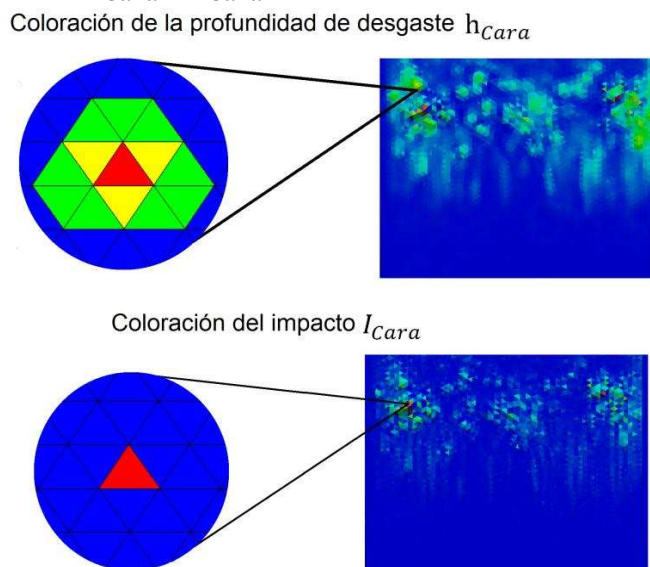


Figura 6: Coloración en función de la profundidad de desgaste v/s. coloración en función del impacto acumulado

En la Figura 6 se puede apreciar como la coloración del impacto entrega un mejor detalle de las ralladuras e impactos, por lo cual se utilizará esta variable al momento de contrastar patrones de desgaste simulados con ensayos reales.

### 3 IMPLEMENTACIÓN DEL EXPERIMENTO EN EL MODELO NUMÉRICO

Para validar el modelo de desgaste en el código MED desarrollado, se implementa el experimento de la rueda de desgaste abrasivo (Erazo, 2013), donde se pueden contrastar los resultados de tasa y patrón de desgaste en condiciones controladas. El experimento consiste en hacer circular sólidos a granel entre la rueda de desgaste y una probeta, que es la placa sometida a desgaste. La velocidad del material abrasivo sobre la probeta se controla con la velocidad de giro de la rueda de desgaste, mientras que la presión, se controla variando la posición de la carga en el brazo del porta-probetas.

En la figura N°7 se muestra el funcionamiento del experimento de la rueda de desgaste y la implementación del experimento en la simulación, donde el conjunto porta-probetas, probeta y carga, es reemplazado por una placa pivoteada en el mismo punto de giro del porta-probetas real. Para realizar la simulación se representó el efecto de la carga por medio de un momento  $M$  aplicado en el punto de pivote del porta-probetas, además se le asignó un momento de inercia a la placa para simular correctamente su dinámica. En este experimento se ensayará mineral de cobre grueso (con granulometría entre 6 y 12 [mm]) y mineral de cobre fino (con granulometría menor a 6 [mm]).

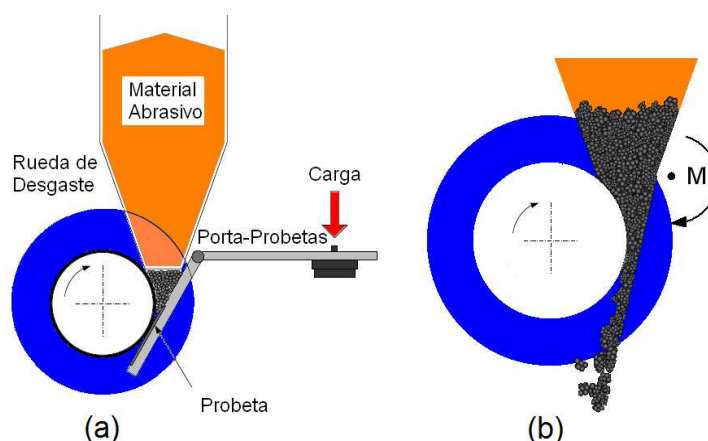


Figura 7: (a) Esquema de la máquina utilizada para medir el desgaste abrasivo. (b) Implementación del experimento en la simulación

#### 4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL A GRANEL

En la caracterización del sólido a granel, se recurre a ensayos y experimentos específicos, donde se ajustan y calculan propiedades del sólido a granel, con el objetivo de representar mediante partículas compuestas y esféricas el comportamiento del mineral de cobre como material granular (Mead et al., 2012). Para aproximar la forma del mineral de cobre, se busca la configuración de partícula compuesta con la mayor semejanza en la proporción media de largo, ancho y alto de una muestra de 10 piedras de mineral de cobre, proponiendo un indicador de error de forma entre el material simulado y el mineral. La configuración de partícula compuesta que minimiza el error de forma es la de 3 elementos con un factor de interferencia de 1,8.

La granulometría medida en base a la masa se transforma a una granulometría en base al número de partículas, lo que permitió simplificar la programación de distribución de tamaño de las partículas, utilizando solo 10 tamaños de partícula para representar la granulometría de la muestra real. Los coeficientes de restitución y de roce estático del mineral con las paredes, fueron calculados mediante ensayos específicos, donde se hace rebotar una muestra de mineral y luego se mide la máxima inclinación que es capaz de soportar el mineral sobre la superficie ensayada (Johnstone, 2010).

Mediante la medición del ángulo de reposo y de la dispersión del mineral, se ajustó el coeficiente de roce entre partículas y el coeficiente de rodadura, para obtener en la simulación del ensayo la misma distribución de partículas del ensayo real.

#### 5 RETROALIMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN Y DEL ENSAYO DE LA RUEDA DE DESGASTE PARA AJUSTAR PROPIEDADES DEL MINERAL

Se propone utilizar información del ensayo de la rueda de desgaste para ajustar propiedades del sólido a granel que no se pudieron obtener con ensayos específicos. Además, se valida la estrategia de acelerar la tasa de desgaste, con el objetivo de minimizar el tiempo de cómputo y hacer factible la simulación.

##### 5.1 Ajuste del coeficiente de roce por flujo de partículas

En el ensayo experimental de la rueda de desgaste, el flujo de partículas se ve fuertemente afectado por el coeficiente de roce entre la pared de goma de la rueda de desgaste y el mineral [3]. Por otro lado, en la puesta en marcha del ensayo de la rueda de desgaste, para garantizar



que las partículas se muevan con la velocidad de la rueda, fue necesario incrementar el coeficiente de roce recubriendo la superficie de la rueda de desgaste con caucho de 2 [mm] de espesor y una capa de cinta *Duct tape*, lo que evidencia una fuerte dependencia entre el coeficiente de roce y el flujo de partículas. Esta dependencia también se pudo apreciar en la simulación, al respecto, se hizo el ejercicio de variar el coeficiente de roce entre la pared de goma y la partícula para ver la respuesta del flujo. Los resultados se aprecian en la Figura 8.

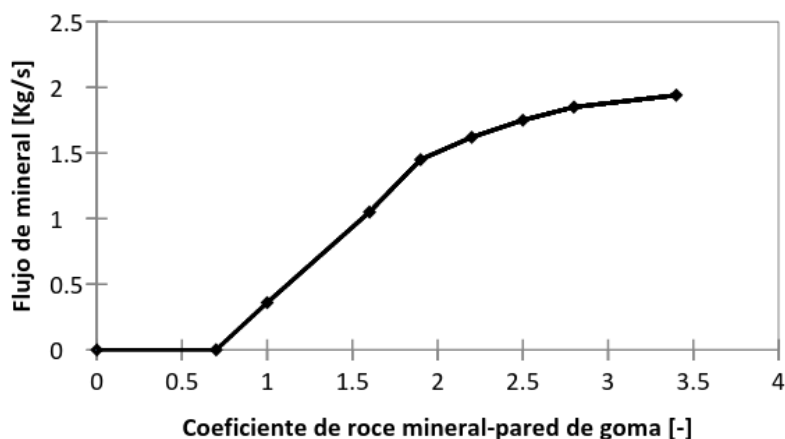


Figura 8: Modelación del flujo de partículas en función del coeficiente de roce de la pared de goma. Mineral de cobre grueso representado con partículas compuestas

De la Figura 8 es posible apreciar una buena respuesta del flujo de mineral en función del coeficiente de roce. Para valores bajos de coeficiente de roce, el flujo tiende a cero porque las partículas quedan estancadas entre la rueda y la placa de desgaste. El flujo máximo de partículas, está limitado por la velocidad de inyección de partículas en la simulación.

Para calibrar el coeficiente de roce entre el mineral y la pared de goma con cinta *Duct tape*, se debe además considerar el hecho de que las aristas del mineral se insertan en la goma. Considerando la cantidad de aspectos necesarios a tener en cuenta para modelar este coeficiente de roce y la alta sensibilidad del flujo de partículas respecto del mismo, se propone utilizar el flujo de partículas del ensayo de la rueda de desgaste para ajustar el coeficiente de roce de la simulación. Se utiliza el método de Newton-Raphson para encontrar el valor del coeficiente de roce para cada tipo de sólido a granel simulado.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de roce entre partícula y pared de goma que se obtienen, para cada tipo de partícula, con condiciones de operación de  $5.706[Nm]$  de momento del porta-probetas y  $4,8[\frac{m}{s}]$  de velocidad tangencial de la rueda de desgaste.

Tipo de mineral	Representación	Flujo	C. de roce pared de goma
		[Kg/min]	[-]
Mineral de cobre grueso	Partícula compuesta	72,82	2,25
	Partícula esférica		2,46
Mineral de cobre fino	Partícula compuesta	44,47	1,936
	Partícula esférica		1,865
Arena	Partícula esférica	30,68	1,043

Tabla 1: Coeficientes de roce estático entre las partículas y la pared de goma, ajustados para igualar el flujo de partículas del ensayo de la rueda de desgaste

## 5.2 Ajuste del coeficiente de roce por tipo de ralladura

Cuando el mineral circula entre la probeta y la rueda del ensayo de desgaste, las presiones y fuerzas de contacto con la superficie son superiores a las del ensayo para medir el coeficiente de roce, lo suficientes como para producir conminución e indentación entre el mineral y la probeta. Para considerar estos efectos en la simulación, se propone un ensayo para calcular un nuevo coeficiente de roce que incorpora el efecto de indentación del material.

El coeficiente de roce entre la placa de desgaste y el mineral, determina si las partículas están rodando o si se están deslizando sobre la superficie, lo cual se refleja en el tipo de ralladura que se obtiene en el patrón de desgaste. Para determinar el coeficiente de roce bajo estas condiciones de presión, se utilizará la información del tipo de ralladura del ensayo para ajustar el coeficiente de roce de la simulación en cada tipo de sólido a granel.

En la Figura 9 se distingue que para valores de coeficiente de roce superiores a 1,8 se obtiene el comportamiento deseado. Este corresponde a un patrón conformado por una nube de puntos, evidenciando que el sólido a granel está principalmente en un estado de rodadura sobre la placa de acero.

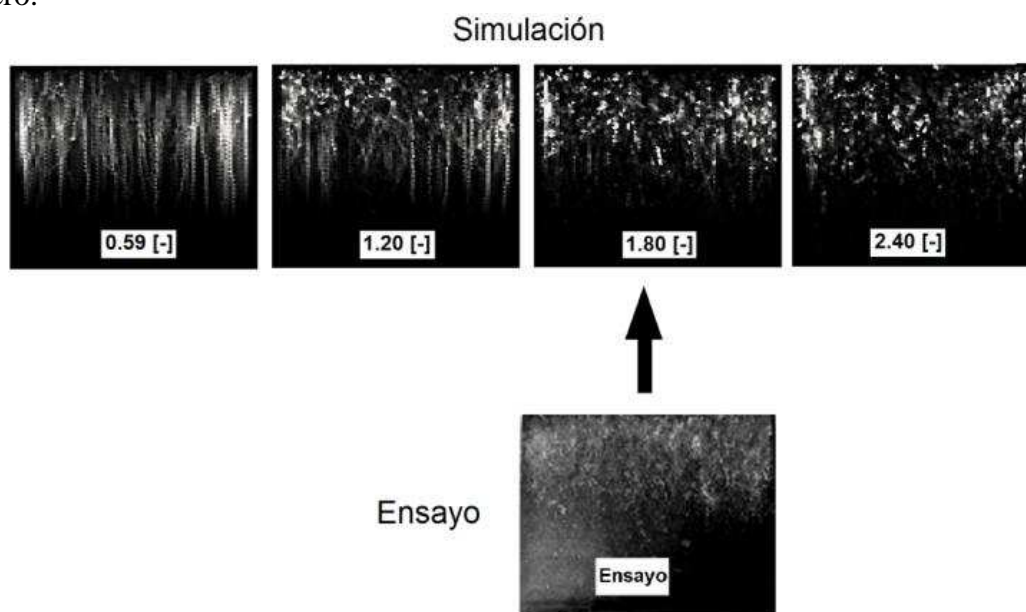


Figura 9: Patrón de las zonas de impacto del mineral de cobre grueso, representado con partículas compuestas, para distintos coeficientes de roce entre la probeta y el sólido a granel

La tasa de desgaste y flujo de partículas disminuye cuando aumenta el coeficiente de roce. Este comportamiento obedece a la ley de Archard. Tras incrementar la fuerza de roce, las partículas dejan de derrapar y empiezan a rodar sobre la superficie, reduciendo las distancias de deslizamiento cuando entran en contacto con la superficie y por ende la cantidad de material que se remueve por desgaste. Además, cuando las partículas están en rodadura, la velocidad del flujo disminuye, por el efecto de estar engranando entre ambas superficies.

Para valores de coeficiente de roce superiores a 2,4 hay un comportamiento estable del flujo y de la tasa de desgaste de los 4 sólidos a granel simulados, escogiendo este valor para el desarrollo de las simulaciones. A pesar de que en la práctica el coeficiente de roce es elevado, los resultados se encuentran en una zona de convergencia, que permite hacer ensayos comparativos entre los dos tipos de mineral de cobre ensayados. Una hipótesis del alto valor del coeficiente de roce ajustado, es que en la simulación el coeficiente de roce tiene que incorporar la fuerza provocada por la indentación que se genera en condiciones de alta carga,

además del efecto del coeficiente de roce dinámico que reduce la magnitud de la fuerza de roce.

### 5.3 Desgaste acelerado

En vez de simular los 500[s] que dura el ensayo real, sólo se simula el periodo de tiempo necesario para tomar datos del flujo de partículas estabilizado y poder visualizar la distribución del patrón de desgaste. Se busca de esta manera, acelerar la tasa de desgaste para disminuir el tiempo de simulación. En cada uno de los casos evaluados se ajustó la tasa de desgaste específica  $K$  tal que la remoción de material sea de 0,2 [g] que es lo que se removió en el ensayo experimental al utilizar mineral de cobre grueso.

En la Figura 10 se distingue que mientras mayor sea el tiempo de simulación, mejor será la distribución de los impactos en la placa de acero. Para 2,8 [s] de simulación ya hay suficientes impactos, como para poder distinguir la distribución de las zonas desgastadas. Por lo que el coeficiente de desgaste específico  $K$  que se utilizará en los siguientes ensayos será de  $4,12^{-11} [\frac{m^2}{N}]$ .

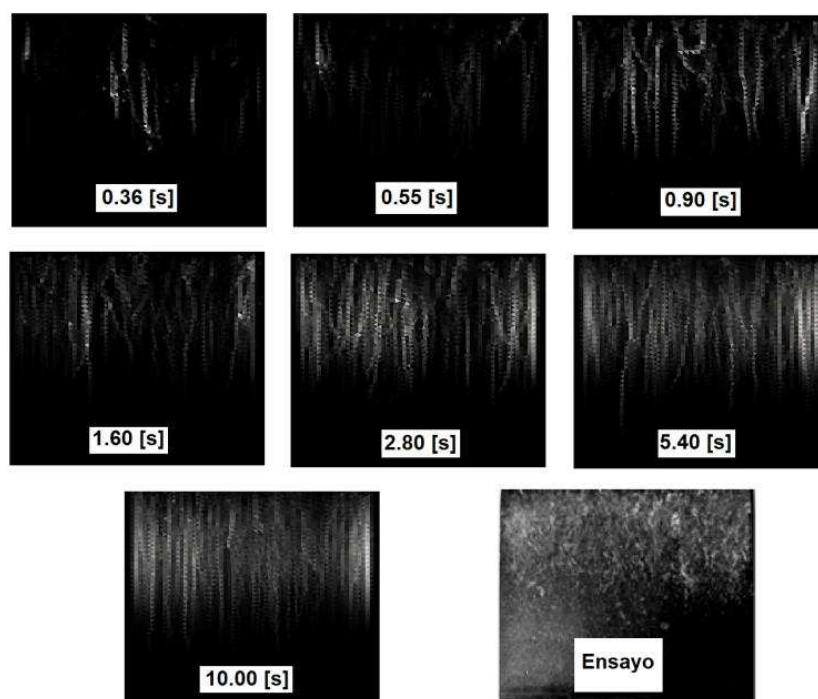


Figura 10: Patrón de las zonas de impacto por mineral de cobre grueso. Representación con partículas compuestas, para distintas tasas específicas de desgaste. En cada patrón se indica el tiempo de simulación requerido para remover 0.2 [g] de material

## 6 RESULTADOS NUMÉRICOS

A continuación se compara el patrón de desgaste que se obtiene mediante la simulación, contrastándolo con el que se obtiene del ensayo experimental. Los resultados corresponden a partículas esféricas y partículas compuestas para ambas granulometrías del mineral de cobre. En la Figura 11 se aprecia como la simulación con mineral de cobre fino es capaz de representar apropiadamente el patrón de desgaste. Respecto de la simulación con mineral de cobre fino, se distingue un patrón más uniforme en la simulación debido al hecho de que en el ensayo experimental, el montaje de caucho sobre la superficie de la rueda de desgaste distorsiona la distribución del patrón de desgaste.

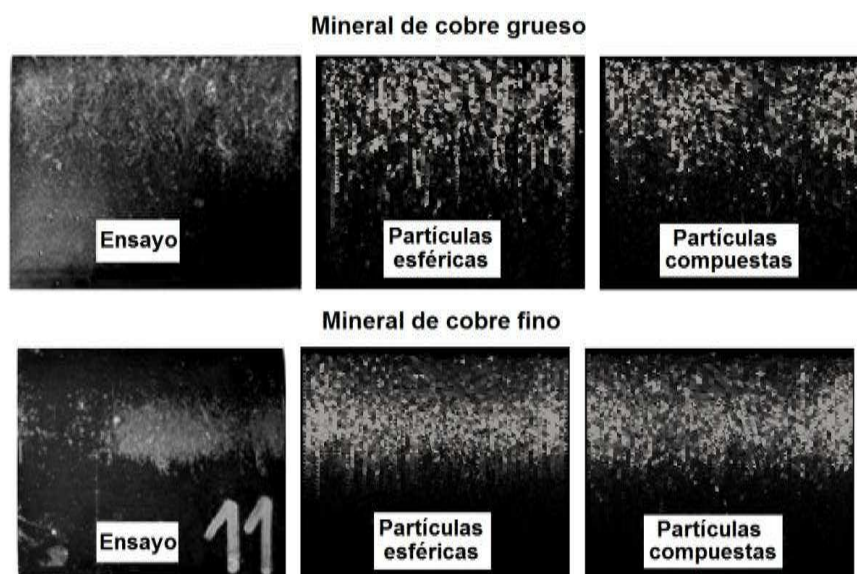


Figura 11: Patrones de impactos para mineral de cobre grueso y mineral de cobre fino. Ensayo experimental y simulación con partículas esféricas y compuestas

Con respecto al análisis de la tasa de desgaste, en la Figura 12, se observa que la gráfica del desgaste acumulado en función del tiempo presenta una tendencia lineal luego de inicializado el modelo de desgaste. Este es el comportamiento esperado de acuerdo al modelo de Archard, donde la pendiente de la recta es la tasa de desgaste obtenida mediante la simulación.

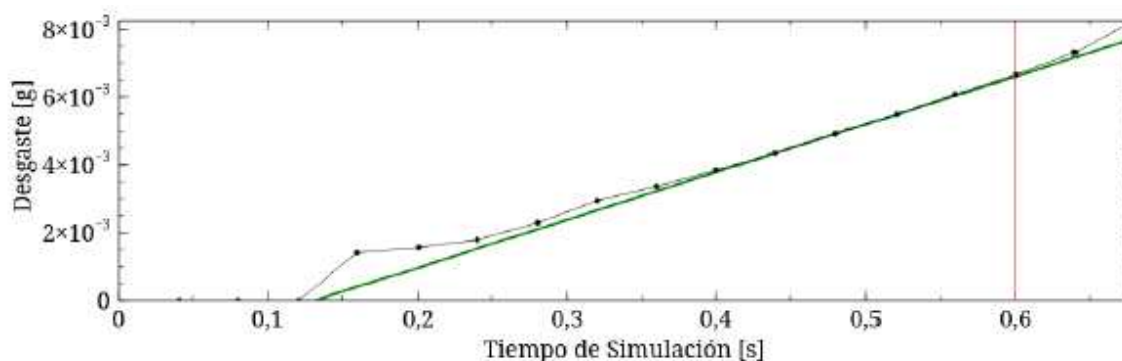


Figura 12: Desgaste acumulado en función del tiempo de simulación

También es posible comparar los dos materiales granulares utilizados en el experimento con los resultados de la simulación. Para ello se calcula el parámetro adimensional “Variación de la tasa de desgaste relativo  $Vd$ ” representado por la ecuación (11).

$$Vd = \frac{D_{MG} - D_{MF}}{D_{MF}} \quad (11)$$

Donde  $D_{MG}$  corresponde a la tasa de desgaste para el material grueso y  $D_{MF}$  la tasa de desgaste para el material fino, respectivamente. En la Figura 13 se distingue que las simulaciones con partículas esféricas y compuestas son capaces de predecir correctamente la tasa de desgaste al disminuir la granulometría del mineral de cobre. Tanto en el patrón de desgaste como en la variación de la tasa de desgaste, no hay diferencias importantes entre la

simulación partículas compuestas y esféricas.

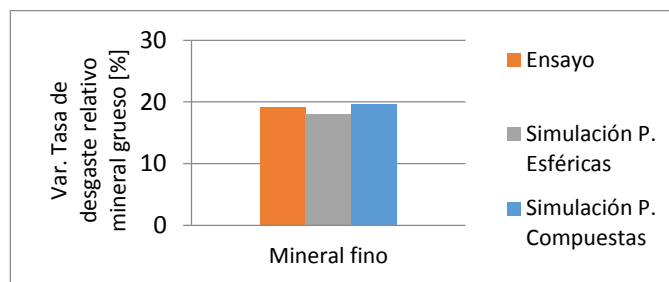


Figura 13: Variación de la tasa de desgaste relativo al mineral de cobre grueso obtenido en el ensayo. Simulación con partículas esféricas y compuestas

## 7 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló e implementó una metodología numérica, basada en el MED, para modelar la pérdida de material asociado al desgaste abrasivo. Esta metodología incluye una propuesta para caracterizar el material granular y calibrar la simulación a partir de ensayos específicos. Al identificar el tipo de ralladura, fue posible determinar si el mineral está rodando o deslizándose sobre la superficie de la probeta. Esta metodología se podría aplicar en otras simulaciones MED, para estimar el coeficiente de roce en condiciones de alta presión.

Se propuso utilizar el flujo de partículas del ensayo experimental de la rueda de desgaste, para ajustar el coeficiente de roce de la simulación en condiciones en donde este no se puede medir directamente. Este método se puede extrapolar en simulaciones MED donde el flujo de partículas sea sensible al coeficiente de roce del mineral sobre la superficie a simular.

El desgaste acelerado representa como un método efectivo para disminuir el tiempo de simulación y cómputo, en el presente trabajo se pudo reducir aproximadamente 56 veces el tiempo de simulación. Esto se logra definiendo un criterio en base a la mínima información requerida para tener un patrón de desgaste desarrollado y comparable con los de la muestra del experimento real.

El modelo numérico fue capaz de predecir correctamente la variación de la tasa de desgaste, al cambiar la granulometría de un mismo material, mostrando patrones de desgaste muy semejantes a los obtenidos en el ensayo. Esto permitió validar el uso del modelo de desgaste de Archard para simular el desgaste abrasivo del experimento de la rueda de desgaste. La similitud de los resultados obtenidos con partículas esféricas y compuestas, muestra que en este caso, es prescindible el uso de partículas compuestas. Por lo que el esfuerzo adicional para caracterizar y simular partículas compuestas no justifican su uso para la simulación del experimento de la rueda de desgaste.

La metodología numérica propuesta es válida para estimar la tasa y el patrón de desgaste y comparar distintos materiales granulares entre sí, mas no el comportamiento para distintas probetas de acero. Esto se debe a que las tasas de desgaste se obtienen para una constante  $K$  calibrada para que en el tiempo total de simulación de 4 [s], se obtenga el mismo desgaste total del ensayo experimental que dura 500 [s]. Se propone como una futura línea de investigación, una metodología consistente en igualar las tasas de desgaste calibrando y tabulando la constante

$K$  para distintos aceros, de manera que el tiempo total de la simulación solo lo determine la estabilización del flujo de material granular sobre la placa de desgaste.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento para la realización del presente trabajo al proyecto DGIP 25.15.55 de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), de Valparaíso, Chile, como también al Aula DIMEC-CIMNE del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, perteneciente a la Asociación Internacional de Aulas CIMNE (AIAC) del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), de Barcelona, España.

## BIBLIOGRAFÍA

- Archard J.F., Contact and Rubbing of Flat Surfaces, *J. Appl. Phys.* 24:981–988, 1953.
- Bhushan B., Modern Tribology Handbook, in: *Mod. Tribol. Handbook*. Vol 1, 2001.
- Cleary P., Modelling comminution devices using DEM, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 25: 83–105, 2001.
- Cundall P. and Strack O., A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*. 29:47-65, 1979.
- Cundall P., Formulation of a three dimensional Distinct Element Model-Part I. A Scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech.* 25: 107–116, 1988.
- Erazo M., Implementación de una máquina para la determinación experimental del desgaste abrasivo de placas de desgaste en chutes, Universidad Técnica Federico Sana María, 2013.
- Estay D. and L.E. Chiang, Discrete crack model for simulating rock comminution processes with the Discrete Element Method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 60: 125–133, 2013.
- Govender N., Wilke D. and Kok S., Blaze-DEMGPU: Modular high performance DEM framework for the GPU, *Technical Report, Powder Technology* 2016.
- Hu G., Hu Z., Jian B., Liu L. and Wan H., On the Determination of the Damping Coefficient of Non-linear Spring-dashpot System to Model Hertz Contact for Simulation by Discrete Element Method, *J. Comput.* 6: 984–988, 2011.
- Johnstone M., Calibration of DEM models for granular materials using bulk physical tests, The University of Edinburgh, 2010.
- Kessler F. and Prenne M., DEM Simulation of conveyor transfer chutes, *FME Trans.* 37: 185–192, 2009.
- Luding S., Introduction to Discrete Element Methods Basics of contact force models and how to perform the micro-macro transition to Continuum Theory, *Discret. Model. Geomaterials.* 785–826, 2008.
- Marigo M. and Stitt E.H., Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets, *KONA Powder Part. J.* 32: 236–252, 2015.
- Mead S. M., Cleary P.W. and Robinson G.K., Characterising the failure and repose angles of irregularly shaped three-dimensional particles using DEM, *Ninth Int. Conf. CFD Miner. Process Ind. CSIRO*, Melbourne, Aust. 1-6, 2012.
- Oñate E., Labra C., Rojek J., Miquel J. y Norte C., Avances en el desarrollo de los métodos de elementos discretos y de elementos finitos para el análisis de problemas de fractura, *An. La Mecánica Fract.* 22: 27–34, 2005.