



## Contribuciones al desarrollo de métodos numéricos de partículas: Método de los Elementos Discretos

**ENTIDAD EJECUTORA PRINCIPAL:** Centro de Estudios de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas

**Instituciones colaboradoras:** Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (DCMTRANS); La Habana, Cuba. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE); Barcelona, España. Empresa Vértices; Holguín, Cuba. Universidad Tecnológica de La Habana (UTH/CUJAE); La Habana, Cuba. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV); Villa Clara, Cuba. Universidad Católica de Lovaina (KU Leuven), Leuven, Bélgica. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos (UCF), Cuba. Universidad de Brasilia (UnB), Brasil. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA). Ciego de Ávila, Cuba. Universidad Federal de Goiás (UFG). Brasil. Universidad Federal de Tocantins (UFT). Brasil. Universidad Técnica de Manabí (UTM), Ecuador.

**AUTORES PRINCIPALES:** Carlos A. Recarey Morfa<sup>1</sup>, Dirk Roose<sup>2</sup>, Eugenio Oñate Ibañez de Navarra<sup>3</sup>, Irvin Pablo Pérez Morales<sup>1</sup>, Márcio Muñiz de Farías<sup>4</sup>, Miguel Herrera Suárez<sup>5</sup>, Roberto Luis Roselló Valera<sup>1</sup>

**Otros autores:** Enrique González Martín<sup>1</sup>, Laura Pérez Triana<sup>1</sup>, Gilberto Quevedo Sotolongo<sup>1</sup>

**Filiación:** <sup>1</sup>UCLV, Cuba; <sup>2</sup>KU Leuven, Bélgica; <sup>3</sup>CIMNE, España; <sup>4</sup>UnB, Brasil; <sup>5</sup>UTM, Ecuador

### RESUMEN

#### Palabras clave

*métodos numéricos de partículas; método de los elementos discretos; modelación multifísica; modelación multiescala*

El desarrollo de la mecánica computacional siempre ha ido paralelo al intento de aproximar mediante modelaciones y simulaciones numéricas la esencia de los fenómenos físicos. Esta es la razón fundamental para desarrollar métodos numéricos (método de partículas: Método de los Elementos Discretos, DEM) que posibiliten realizar estudios multifísicos fiables y en diferentes escalas (macro-, meso-, micro-, etc.). Es por eso que el objetivo primordial del presente trabajo es efectuar contribuciones novedosas al desarrollo de las tecnologías numéricas de avanzada (DEM) que hoy por hoy son temas de singular interés e importancia los centros de investigación de élite mundial. En este sentido el trabajo se centra en el desarrollo de los métodos de partículas (DEM), con especial énfasis en la modelación multifísica y multiescala, con el método de los elementos discretos (DEM). El trabajo de investigación se centra en desarrollar el métodos numéricos (DEM), con especial énfasis a su formulación física para la solución numérica de las ecuaciones de gobierno, con su correspondiente implementación computacional y solución de complejos (multifísicos y a diferentes escalas) problemas de ingeniería. Se hace especial énfasis en la modelación multiescala y en modelación a microescala de la mecánica computacional. Las principales aportaciones que se reporta en el presente trabajo es la formulación genérica del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional. Adicionalmente se efectúa una formulación

multifísica del método de los elementos discretos para enfrentar problemas acoplados: mecánico y termoacoplados, incluyendo los problemas de desgastes. Se establecen las formulaciones que consideran las partículas deformables o no. Se desarrollan nuevos modelos constitutivos de contacto para describir diversos tipos de materiales. Se efectúa la implementación computacional y su correspondiente validación. Se efectúa una formulación acoplada del método de los elementos finitos (MEF) con el DEM. Análogamente se acopla el DEM con otros métodos. Se realizan estudios de interrelación entre los parámetros constitutivos de contacto y los parámetros constitutivos convencionales. Se resuelven complejos problemas de ingeniería no resueltos eficientemente por los métodos convencionales. Se resuelven diversos problemas que se enfrentan en los diferentes proyectos nacionales e internacionales. Las contribuciones aportadas a este método son aspectos de relevancia internacional porque son las primeras que se reportan para el caso de formulación genérica del DEM y la modelación de modelación multifísica acoplada de dicho método. Los resultados científicos que forman parte de este trabajo constituyen aportes novedosos y originales de significación al campo de la ciencia y a la modelación numérica con métodos de partículas (DEM). Estos resultados le han permitido a Cuba tener representación como miembro del comité científico del congreso "Particle" de la Asociación Internacional de Mecánica Computacional (IACM), de conjunto con instituciones científicas y académicas emblemáticas de élite mundial.

---

A lo largo de los años el hombre ha adoptado una posición científica al tratar de estudiar los fenómenos físico-naturales que ocurren a su alrededor. En este proceso ha aceptado un aumento de responsabilidad y esfuerzo, problema este que condiciona incluso el desarrollo de la humanidad. En este camino ha podido elegir entre dos grupos de soluciones: ahorrar sus esfuerzos y limitarse a tomar lo que la naturaleza le brinda casi directamente o intentar arrancarle el máximo de ventajas y satisfacciones materiales a cambio de un conocimiento y dominio previo de las leyes del mundo material. Con este fin, en los últimos tiempos ha estado en boga el empleo de las técnicas de modelación para intentar investigar estas leyes y fenómenos. Al respecto, la modelación ha adquirido un carácter de método científico general que, en esencia, penetra todas las esferas de la actividad cognoscitiva y transformadora del hombre, con especial énfasis en las ciencias y la ingeniería. Este aspecto se ha enriquecido por las conquistas y desarrollo de la matemática, la computación y el enfoque sistémico, lo cual posibilita la profundización de los conocimientos sobre el mundo circundante y se convierte en medio de dirección y de toma de decisiones racionales sobre problemas de utilización de la naturaleza.

El aumento de la importancia de los métodos de modelación en el conocimiento científico está determinado, ante todo, por la lógica interna del desarrollo de la ciencia; en particular, por la frecuente necesidad de un reflejo mediatizado de la realidad objetiva. En el desarrollo y proliferación de la modelación han tenido una gran trascendencia las consideraciones económicas relacionadas con el aumento de la efec-

tividad de las investigaciones científicas y la optimización de la actividad humana, en términos generales. Debe señalarse que, a pesar de que en los últimos años haya aumentado la intensidad de las investigaciones en el campo de la modelación, la problemática metodológica de este importante método del conocimiento científico moderno está muy lejos de haber sido agotada. Importantísimos problemas gnoseológicos de la modelación deben ser estudiados minuciosamente a la luz de las circunstancias de la ciencia de nuestros días. Esta situación puede explicarse por el hecho de que el método de la modelación en la ciencia actual es muy complicado y diverso y, lo que es fundamental, se encuentra en un estado de permanente enriquecimiento y desarrollo. La ingeniería no ha quedado ajena a este desarrollo, por lo que se buscan nuevos enfoques con carácter general y sistémico, para la solución de los diferentes problemas que enfrenta un ingeniero.

Estos aspectos han fomentado el desarrollo de nuevos métodos numéricos de partículas, en particular el método de los elementos discretos (DEM) o elementos distintos, como también se le conoce. Los métodos de partículas (DEM) son técnicas muy novedosas para el estudio de medios continuos y discretos donde estén presente fenómenos de grandes deformaciones y discontinuidades.

El desarrollo de la mecánica computacional siempre ha ido paralelo al intento de aproximar, mediante modelaciones y simulaciones numéricas, la esencia de los fenómenos físicos. Los modelos numéricos se basan en el estudio de los problemas de ingeniería en diferentes escalas, y cada vez más

se trata de modelar a una escala cada vez menor, en la actualidad hasta la escala microscópica. Todo trabajo investigativo que intente el estudio del macro-, el meso- y el micromundo y sus leyes de comportamiento es una tarea de constante investigación, tendencia donde se centra la finalidad de este trabajo. El hecho de poder estudiar los fenómenos físicos a diferentes escalas, incluida la escala microscópica, posibilita detectar la aparición de microfisuras y discontinuidades que son el comienzo de las cadenas de fallos estructurales y la formación de microzonas de plastificación, que culminan desafortunadamente a nivel macroscópico en el fallo estructural. Esta es la razón fundamental para desarrollar métodos numéricos que posibiliten realizar estudios multifísicos y multiescala y es, por tanto, el objetivo primordial del presente trabajo, pues hoy por hoy es un tema de singular interés e importancia para los centros de investigación de élite mundial.

En este sentido, el trabajo aborda el desarrollo de los métodos de partículas, con especial énfasis en el método de los elementos discretos (DEM). Las contribuciones a estos métodos numéricos se enfocan en:

- Formulación genérica (multiescala) del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional considerando las partículas deformables o no.
- Formulación multifísica del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas acoplados: termomecánicos acoplados, incluida la simulación de problemas de desgastes. Este aspecto es una contribución de relevancia internacional por ser un reporte novedoso realizado en este sentido a esta formulación numérica.
- Establecimiento de nuevos modelos constitutivos de contacto para el método de los elementos discretos para describir el comportamiento de diversos tipos de materiales.

Este aspecto es una contribución de relevancia internacional por ser un aporte novedoso realizado en este sentido a esta formulación numérica a nivel constitutivo para este método (DEM).

- Se efectúan formulaciones acopladas (DEM/FEM y DEM/PFEM) entre el método de los elementos discretos (DEM) y los métodos de elementos finitos (FEM) y método de los elementos finitos de punto (PFEM). Estos dos aspectos presentan una singular importancia ya que son los dos primeros reportes de este acoplamiento entre estos métodos.

- Implementación computacional multifísica y multiescala del método de los elementos discretos y sus formulaciones acopladas con otros métodos numéricos, soportadas en tecnologías de manejo masivo de información y paralelización.
- Se realizan estudios de interrelación entre los parámetros constitutivos de contacto y los parámetros constitutivos convencionales. Este aspecto presenta una novedad singular, debido a que dichos aspectos limitan el uso del método de los elementos discretos (DEM).
- Resolución de complejos problemas de ingeniería no resueltos eficientemente hasta el momento por las tecnologías numéricas establecidas (método de los elementos finitos, diferencias finitas, volúmenes finitos, elementos de contorno, etc.)

Algunas de las aportaciones esenciales del método de elementos discretos (DEM) se detallan sintéticamente en los anexos entregados para el premio, donde también se encuentra una descripción más detallada de estos resultados a partir de las diferentes publicaciones efectuadas y en las tesis (tesis de grado, maestría y doctorado) defendidas o los informes de proyectos emitidos. Las aplicaciones efectuadas y la resolución de complejos problemas de ingeniería se evidencian en los diferentes proyectos de investigación desarrollados. Es justo destacar que en este trabajo científico la gran mayoría de las tesis (tesis de grado, maestría y doctorado) han sido dirigidas conjuntamente por integrantes de las diferentes instituciones que forman parte de la propuesta de premio, especialmente de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, la Universidad de Brasilia, la Universidad Católica de Lovaina y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería.

Los desarrollos teóricos y básicos se han efectuado en la Universidad Central de Las Villas, y se han implementado en varios códigos computacionales. Los códigos computacionales están siendo utilizados en estos momentos en varias instituciones que forman parte de la propuesta de premio en el desarrollo de tesis y proyectos de investigación conjunta con tutoría y titulación compartida. Una enumeración detalla de los aspectos anteriores se puede encontrar a continuación:

- La investigación presentada ha estado respaldada por la realización de 4 proyectos internacionales de cooperación científica con una institución de elite mundial (CIMNE) en la temática de métodos numéricos, 4 proyectos nacionales en ejecución, 9 proyectos

internacionales concluidos, 7 proyectos internacionales en ejecución, 8 proyectos europeos en ejecución donde participan los investigadores cubanos que forman parte de la propuesta de premio. En este último caso la participación no es directa, ya que son proyectos para centros europeos, pero como parte de los convenios existentes entre K.U Leuven-UCLV, UnB-CUJAE, UnB-UCLV y UCLV-CIMNE; se incluye en los ellos la participación de los investigadores de Cuba. En estos proyectos se hace uso de las diferentes contribuciones desarrolladas a los métodos de partículas (DEM) y, además, se utilizan activamente los códigos computacionales desarrollados en la Universidad Central de Las Villas. Como parte de las acciones de todos los proyectos, los desarrollos establecidos en esta investigación han sido aplicados a la resolución de diversos problemas de ingeniería, no resueltos fiablemente por los métodos numéricos convencionales.

- En el trabajo se reporta como aspecto significativo la publicación de 29 artículos en revistas del grupo I y 17 artículos en otros tipos de revistas. Además se han publicado 39 artículos en memorias de congresos de relevancia internacional. Colateralmente, en congresos internacionales realizados en Cuba se ha reportado 18 publicaciones. Adicionalmente, se han efectuado 3 monografías y 2 reportes técnicos, a lo que se unen todos los reportes de los proyectos nacionales e internacionales elaborados.
- Adicionalmente, como parte del trabajo se han desarrollado diversas investigaciones científicas, que han culminado con 17 trabajos de diploma, 11 tesis de

maestría y 10 tesis doctorales. Estos trabajos incluyen tesis desarrolladas en Cuba, tesis desarrolladas por profesionales cubanos en entidades extranjeras (con tutoría y titulación compartida) y tesis desarrolladas por extranjeros en universidades extranjeras pero tutoradas y asesoradas por profesionales cubanos y extranjeros (tutoría compartida) que han aplicado los desarrollos teóricos y los códigos computacionales que forman parte de la propuesta de premio.

- El trabajo presenta avales de varias universidades del país, de empresas cubanas y de otras entidades académicas y científicas internacionales. Se destacan, dentro de los avales presentados, algunos emitidos por personalidades mundiales en la temática.

Los resultados científicos que forman parte de este trabajo realizan aportes novedosos y originales de significación al campo de la ciencia y a la modelación numérica con métodos de partículas (en específico al DEM). Estos resultados le han permitido a Cuba tener representación como miembro del comité científico del congreso "Particle" de la Asociación Internacional de Mecánica Computacional (IACM), de conjunto con instituciones científicas y académicas emblemáticas de élite mundial.

#### AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA:

**Dr. Ing. Carlos A. Recarey Morfa.** *Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Centro de Estudios de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería. Carretera a Camajuaní km 5½, Santa Clara, Villas Clara, Cuba. Correo electrónico: recarey@uclv.edu.cu*