



## Desarrollo de tecnologías numéricas de avanzada para la modelación de problemas de ingeniería: Contribuciones a los métodos SPH y MPM

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

**Instituciones participantes:** 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. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana (UTH/CUJAE); La Habana, Cuba. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV): Centro de Investigaciones Agropecuaria, Centro de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería, Facultad de Construcciones, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Facultad de Matemática Física y Computación; Villa Clara, Cuba. Universidad Católica de Lovaina (KU Leuven): Departamento de Biosistemas, Departamento de Ciencias de la Computación; Leuven, Bélgica. Universidad de Brasilia (UnB): Facultad de Tecnología (FT), Laboratorio de Infraestructura (InfraLab); Brasil. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA); Ciego de Ávila, Cuba. Facultad Ciencias Técnicas Universidad Federal de Goiás (UFG); Brasil. Universidad Federal de Tocantins (UFT); Brasil.

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

**Otros autores:** Yaidel Reyes López<sup>1</sup>, Elizabeth Hernández Zubeldia<sup>5</sup>, Raydel Lorenzo Reinaldo<sup>5</sup>, Manuel Alejandro Castro Fuentes<sup>1</sup>, Eduardo Miguel Fírvida Donéstevez<sup>1</sup>, Manoel Porfírio Cordão Neto<sup>4</sup>, Gilberto Quevedo Sotolongo<sup>1</sup>

**Filiación:** <sup>1</sup>Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV). <sup>2</sup>K.U. Leuven, Bélgica. <sup>3</sup>CIMNE, España. <sup>4</sup>UnB, Brasil. <sup>5</sup>UTH (CUJAE), Cuba

### RESUMEN

#### Palabras clave

tecnologías numéricas; modelación de problemas; método SPH; método MPM

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 (SPH y MPM) que posibiliten realizar estudios multifísicos fiables. Es por eso que el objetivo primordial del presente trabajo es efectuar contribuciones novedosas al desarrollo de las tecnologías numéricas de avanzada (MPM y SPH), 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 (SPH y MPM), con especial énfasis en la modelación multifísica, con los métodos siguientes: hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) y método de punto material (MPM). El trabajo de investigación se centra en desarrollar los diferentes métodos numéricos (SPH y MPM), 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) problemas de ingeniería. Las principales aportaciones que se reporta en el presente trabajo son: la formulación del método de punto material (MPM) para la solución de problemas geomecánicos donde estén presentes problemas de grandes deformaciones y la formulación del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para la modelación de problemas de sólidos con grandes deformaciones. En la MPM se incluyen modelos constitutivos de avanzada para modelar geomateriales. Se formula el acoplamiento entre MPM y otros métodos numéricos. Se efectúa además la validación de la implementación numérica y computacional realizada. Se resuelven problemas complejos de geomecánica no abordados con fiabilidad por los métodos numéricos más convencionales. Como parte de los proyectos nacionales e internacionales que se ejecutan o culminaron se realizan múltiples aplicaciones de las formulaciones establecidas. La SPH comprende la formulación multifísica acopada (fluido-sólido) del SPH para la solución de problemas de geomecánica en grandes deformaciones y de erosión de suelos. Inclusión en la formulación SPH de modelos constitutivos de avanzada de para modelar geomateriales y fluidos. Se efectúa la implementación numérica y computacional del método SPH y se hacen las validaciones correspondientes. Se resuelven problemas de grandes deformaciones y de erosión de suelos no resueltos con fiabilidad por los métodos convencionales. Se aplican las formulaciones realizadas en los proyectos nacionales e internacionales que se ejecutan o culminaron. 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 (SPH y MPM). 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 efectividad 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, como es el caso del Méto-

do de punto material (MPM) y el de Hidrodinámica suavizada de partículas (SPH). Los métodos de partículas (MPM y SPH) son técnicas muy novedosas para el estudio de medios continuos donde estén presente fenómenos de grandes deformaciones.

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 que en ocasiones tienen carácter multifísico. Todo trabajo investigativo que intente el estudio multifísico de los fenómenos físicos 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 con comportamiento multifísico acoplado posibilita efectuar estudios más completos y fiables.

En este sentido el trabajo aborda el desarrollo de los métodos de partículas, con especial énfasis en los métodos MPM y SPH. Las contribuciones a estos métodos numéricos se enfocan en:

MPM:

- Formulación del método de punto material (MPM) a problemas geomecánicos de grandes deformaciones (ensayos de penetración-en campo: SPT, CPT, DMT; en laboratorios: ensayo de penetración de cono y el ensayo de veleta, inca de pilotes, deslizamientos de taludes, etc.). Se formula el acoplamiento entre MPM y otros métodos numéricos. Este aspecto es una contribución de relevancia internacional, por ser el primer reporte realizado con esta generalidad en la formulación numérica de MPM.
- Formulación de modelos constitutivos (macroestructurales) elastoplásticos de avanzada en el método de MPM, enfocados al estudio de problemas geotécnicos. Este aspecto es una contribución de relevancia internacional por ser un reporte novedoso realizado en este sentido a esta formulación numérica a nivel constitutivo para este método (MPM) enfocado a la resolución de problemas geomecánicos en grandes deformaciones.
- Validación de las implementaciones numérica y computacional realizadas al método MPM enfocado a la resolución de problemas geotécnicos y geomecánicos. La implementación se realizó sobre el código NairnMPM que está previsto para otras finalidades.
- Resolución de problemas geomecánicos de grandes deformaciones y otros campos de la ingeniería mencionados, no resueltos con fiabilidad por los métodos

establecidos (método de los elementos finitos, diferencias finitas, volúmenes finitos, elementos de contorno, etc.).

SPH:

- Formulación del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para el caso de la modelación de problemas de mecánica de sólidos (énfasis en problemas de geomecánica). Este aspecto es una contribución de relevancia internacional por ser el primer reporte realizado en este sentido a esta formulación numérica del SPH. El método SPH se concibió inicialmente para resolver problemas de fluido.
- Formulación multifísica (sólido-fluido en dominios diferentes) acoplada del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH). Este aspecto es una contribución de relevancia internacional por ser el primer reporte realizado en este sentido a esta formulación numérica para este método (SPH).
- Formulación del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para la modelación de problemas de erosión de suelos (acoplamiento de fluido y sólido en un mismo dominio).
- Implementación computacional y paralelización del método SPH en su concepción para mecánica de sólidos (geomecánica y geotecnia) y problemas acoplados (fluido-sólido).
- Formulación de modelos constitutivos macroestructurales elastoplásticos en el método de SPH. Este aspecto es una contribución de relevancia internacional por ser el primer reporte realizado en este sentido a esta formulación numérica a nivel constitutivo para este método (SPH).
- Validación de las implementaciones computacionales realizadas en el método SPH.
- Resolución de problemas de grandes deformaciones, erosión de suelos y otros campos de la ingeniería no resueltos con fiabilidad por los métodos establecidos (método de los elementos finitos, diferencias finitas, volúmenes finitos, elementos de contorno, etc.)

Los resultados relacionados con el método de MPM se describen 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. Tales resultados han sido divulgados en congresos y revistas de relevancia internacional y en otras de menor categoría. 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. Las aplicaciones de los resultados científicos alcanzados se han materializado en los diferentes proyectos nacionales e internacionales donde han participado o participan los autores de la presente propuesta.

Una enumeración detalla de los aspectos anteriores, se puede encontrar a continuación:

- La investigación presentada ha estado respaldada por la realización de: 4 proyectos nacionales en ejecución, 9 proyectos internacionales concluidos, 6 proyectos internacionales en ejecución, 7 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 ellos la participación de los investigadores de Cuba. En estos proyectos se hace usos de las diferentes contribuciones y códigos computacionales desarrollados a los métodos de partículas (MPM y SPH). 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 12 artículos en revista del grupo I. Además se han publicado 20 artículos en memorias de congresos

de relevancia internacional. A ello se unen todos los reportes de los proyectos nacionales e internacionales elaborados que no han sido contabilizados en las publicaciones reportadas como parte de la propuesta de premio.

- Adicionalmente como parte del trabajo se ha desarrollado diversas investigaciones científicas que han culminado con 8 tesis de maestría y 5 tesis doctorales. Estos trabajos incluyen 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 (SPH y MPM). 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, Villa Clara, Cuba. Correo electrónico: recarey@uclv.edu.cu*