



# PROPUESTA DE PREMIO DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA - 2017 -

**Título del Resultado:** *“Desarrollo de tecnologías numéricas de avanzada para la modelación de problemas de ingeniería: Contribuciones a los Métodos SPH, MPM y DEM.”*












**Entidad ejecutora principal que presenta la Propuesta de Premio:**

*Centro de Estudios de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería.  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.*

**Autores Principales y Coordinadores Científicos (Organizados por orden alfabético):**

Carlos A. Recarey Morfa (Coordinador Científico General)  
Dirk Roose (Coordinador Científico por Bélgica)  
Eugenio Oñate Ibañez de Navarra (Coordinador Científico por España)  
Irvin Pablo Pérez Morales (Coordinador Científico por Cuba)  
Márcio Muñiz de Farias (Coordinador Científico por Brasil)  
Miguel Herrera Suárez (Coordinador Científico por Ecuador)  
Roberto Luis Roselló Valera

**Instituciones (Organizadas por orden alfabético):**

-  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 (CUJAE). La Habana, Cuba.
-  Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba.
-  KU Leuven (Universidad Católica de Lovaina), Leuven, Bélgica.
-  Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
-  Universidad de Brasilia (UnB).
-  Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez. Ciego de Ávila, Cuba.
-  Universidad Federal de Goiás (UFG). Brasil
-  Universidad Federal de Tocantins (UFT). Brasil.



**DATOS GENERALES DE LA PROPUESTA DE PREMIO:**

**Título del resultado:** *“Desarrollo de tecnologías numéricas de avanzada para la modelación de problemas de ingeniería: Contribuciones a los Métodos SPH, MPM y DEM.”*

**Entidad ejecutora principal que presenta la Propuesta de Premio:**

*Centro de Estudios de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería.  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.*

**Autores Principales y Coordinadores Científicos (Organizados por orden alfabético):**

- ✚ Carlos A. Recarey Morfa (Coordinador Científico General)
- ✚ Dirk Roose (Coordinador Científico por Bélgica)
- ✚ Eugenio Oñate Ibañez de Navarra (Coordinador Científico por España)
- ✚ Irvin Pablo Pérez Morales (Coordinador Científico por Cuba)
- ✚ Márcio Muñiz de Fariás (Coordinador Científico por Brasil)
- ✚ Miguel Herrera Suárez (Coordinador Científico por Ecuador)
- ✚ Roberto Luis Roselló Valera

**Autores (Organizados por orden alfabético e instituciones):**

- ✚ **Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (DCMTRANS), La Habana, Cuba.**
  1. Antonio Jesús Linares Alfonso
  2. Eduardo Sánchez Hernández
  3. Julio Antonio Álvarez Rodríguez
- ✚ **Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, España.**
  4. Alberto Ferriz Canals
  5. Antonia Larese de Tetto
  6. Benjamín Suarez Arroyo
  7. Carlos Labra González
  8. Debanjan Mukherjee
  9. Eva Balsa
  10. Eugenio Oñate Ibañez de Navarra (Coordinador Científico por España)
  11. Fernando Salazar González
  12. Ferran Arrufat Garcia
  13. Francisco Zárate Araiza
  14. Gerardo Socorro Mirandas
  15. Guillermo Casas González
  16. Hubert Kargl
  17. Ignasi de Pouplana Sardà
  18. Ilaria Iaconeta
  19. Jerzy Rojek
  20. Jan Akerman
  21. Joaquín Irazábal González
  22. Jorge Suit Pérez
  23. Josep María Carbonell Puigbó
  24. Juan Miquel Canet
  25. Kedar Mukund Deshpande
  26. Khaydar Valiullin
  27. Lev Ring
  28. Mercé López Núñez
  29. Miguel Ángel Celigueta Jordana
  30. Miguel Enrique Cerrolaza Rivas
  31. Miquel Santasusana Isach



32. Okan Su
33. Oscar Fruitos Bickham
34. Pere-Andreu Ubach de Fuentes
35. Peter Wriggers
36. Riccardo Rossi
37. Salvador Latorre Sánchez
38. Sara Burrell Diez
39. Sergio Idelsöhn Barg
40. Tarek I. Zohdi
41. Uwe Restner
42. Varadaraju (Raju) Gandikota

✚ **Empresa Vértices. Holguín. Cuba**

43. Dalia Pupo Ordoño
44. Víctor Manuel Valdés Jiménez

✚ **Universidad Tecnología de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.**

- ✚ Facultad de Ingeniería Civil
- 45. Eduardo Tejeda Piusseaut
- 46. Félix Michael Hernández López
- 47. Janet Otmara Martínez Cid
- 48. Milena Mesa Lavista
- 49. William Cobelo Cristiá

✚ **Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba.**

- ✚ Centro de Investigaciones Agropecuarias.
- ✚ 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
- 50. Alcides Viamontes Esquivel
- 51. Alejandro Duffus Scott
- 52. Álvaro J. Fuentes Suárez
- 53. Carlos A. Recarey Morfa (Coordinador Científico General)
- 54. Ciro Iglesias Coronel
- 55. Denis Deniz Gonzalez
- 56. Eduardo Miguel Fírvida Donéstevez
- 57. Elvis López Bravo
- 58. Enrique Gonzalez Martin
- 59. Ernesto Chagoyen Méndez
- 60. Gilberto Quevedo Sotolongo
- 61. Gilles Cadoce
- 62. Harold Díaz-Guzman Casañas
- 63. Heikel Yervilla Herrera
- 64. Irvin Pablo Pérez Morales (Coordinador Científico por Cuba)
- 65. Ismay Pérez Sánchez
- 66. Laura Pérez Triana
- 67. Lucía Argüelles Cortés
- 68. Manuel A. Castro Fuentes
- 69. Marcelino Rodríguez Cancio
- 70. Maykel Bermúdez Casanova
- 71. Omar González Cueto
- 72. Raimel Santos Rubio
- 73. Raúl González López
- 74. Roberto Roselló Valera
- 75. Sergio Betancourt Rodríguez
- 76. Thien Dinh Duc
- 77. Yaidel Muñiz Acosta
- 78. Yaidel Reyes López



- 79. Yordanis Pérez Brito
- 80. Yunier Pérez Camacho
- 81. Yoandry Socarrás Armentero
- 82. Jorge Daniel López Morfa

✚ **KU Leuven (Universidad Católica de Lovaina), Leuven, Bélgica.**

- ✚ Departamento de Biosistemas
- ✚ Departamento de Ciencia de la Computación
- 83. Bart Smeets
- 84. Dirk Roose (Coordinador Científico por Bélgica)
- 85. Herman Ramon
- 86. Simon Vanmaercke
- 87. Engelbert Tijssens
- 88. Ha Hong Bui

✚ **Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.**

- ✚ Facultad de Ciencias Agrarias
- 89. Ángel Lázaro Sánchez Iznaga
- 90. Reinaldo Pérez Armas

✚ **Universidad de Brasilia (UnB).**

- ✚ Facultad de Tecnología (FT),
- ✚ InfraLab
- 91. Alfred Septian
- 92. Benedict Rogers
- 93. Bernardo Cascão Pires e Albuquerque
- 94. Bruna Mota Mendes Silva Tedesco
- 95. Bruno Rogério da Hora Lôbo
- 96. Carlos Eduardo Veras Neves
- 97. Cristhian Mendoza
- 98. Daichao Sheng
- 99. David J. Williams
- 100. Dorival M. Pedroso
- 101. Elizabeth Hernández Zubeldia
- 102. Gabriel Jaime Zapata Guerra
- 103. Georgios Fourtakas
- 104. Hernán Martínez Carvajal
- 105. Jhon F. Romaña García
- 106. John Nairn
- 107. Jorge E. Alarcón
- 108. José Ricardo Girardi Júnior
- 109. Luis David Medina Chaparro
- 110. Manoel Porfírio Cordão Neto
- 111. Marc R. Ruest
- 112. Marcelo Llano Serna
- 113. Márcio Muñiz de Farias (Coordinador Científico por Brasil)
- 114. Oisy Menéndez
- 115. Renato Pinto da Cunha
- 116. Robinson Andrés Giraldo Zuluaga
- 117. Teruo Nakai
- 118. Yamile Valencia González.

✚ **Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.**

- ✚ Facultad Ciencias Técnicas
- 119. Jorge D. Bonilla Rochas
- 120. Rigoberto A. Pérez Reyes
- 121. Aníbal Sánchez Numa
- 122. Gilberto Rodríguez Plasencia



- ✚ **Universidade Federal de Goiás (UFG). Brasil**  
123. Liosber Medina García
- ✚ **Universidade Federal de Tocantins (UFT). Brasil.**  
124. Raydel Lorenzo Reinaldo
- ✚ **Universidade Técnica de Manabí. Ecuador.**
  - ✚ Instituto de Investigaciones Científicas, Desarrollo y Transferencias de Tecnología.  
125. Miguel Herrera Suárez (*Coordinador Científico por Ecuador*)

**Colaboradores: 9 (Organizados por orden alfabético)**

- 126. César A. Chagoyen Méndez (UCLV)
- 127. Eduardo Soudah (CIMNE)
- 128. Gregorio Aragón López (MITRASN)
- 129. Lisbeidy Guzmán Subiaurria (UCLV)
- 130. Rodys César Chao Sanchez (UCLV)
- 131. William Felipe Prieto (UCLV)
- 132. Yusnel Rojas García (UCLV)

**Resumen:**

El desarrollo de la Mecánica Computacional siempre ha ido paralelo al intento de aproximar mediante modelaciones y simulaciones numéricas a la esencia de los fenómenos físicos. Esta es la razón fundamental para desarrollar métodos numéricos (SPH, MPM y DEM) que posibiliten realizar estudios multi-físicos 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 (MPM, SPH y 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 (SPH, MPM y DEM), con especial énfasis en la modelación multi-física y multi-escala, con los métodos siguientes: Hidrodinámica suavizada de partículas (SPH), método de punto material (MPM) y método de los elementos discretos (DEM). El trabajo de investigación se centra en desarrollar los diferentes métodos numéricos (SPH, MPM y 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 (multi-físicos y a diferentes escalas) problemas de ingeniería.

Las principales aportaciones que se reporta en el presente trabajo son:

**✚ MPM**

✚ Formulación del método de punto material (MPM) para la solución de problemas geomecánicos, donde esté presente problemas de grandes deformaciones. Inclusión en esta formulación (MPM) de 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. Las contribuciones aportadas a este método son aspectos que presenta relevancia internacional porque son las primeras que se reportan para el caso de modelación de problemas geomecánicos.

**✚ SPH**

✚ Formulación del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para la modelación de problemas de sólidos con grandes deformaciones. Formulación multifísica acoplada (fluido-sólido) del método de hidrodinámica suavizada de partículas (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 para modelar geomateriales y fluidos. Se efectúa la implementación 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. Las contribuciones aportadas a este método son aspectos que presenta relevancia internacional porque son las primeras que se reportan para el caso de modelación de sólidos y problemas multifísicos.

**✚ DEM**

✚ Formulación genérica del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional. Adicionalmente se efectúa una formulación multi-física del método de los elementos discretos para enfrentar problemas acoplados: mecánico y termo-acoplados incluido los problemas de desgastes. 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. De análogo se acopla el método de los elementos finitos de puntos (PFEM) con DEM. 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 diferentes problemas que se enfrentan en los diferentes proyectos nacionales e internacionales. Las contribuciones aportadas a este método son aspectos que presenta 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.



**Nota aclaratoria:** En el caso del método de los elementos discretos (DEM) no se incluyen los aportes realizados en los temas de: 1 - Generación de partículas, 2 - Evaluación de la calidad de las mallas de partículas, 3 – Generación geométrica de estructuras micro de materiales, ya que estos trabajos recibieron en el 2016 el premio Anual de la Academia de Ciencias.

La investigación presentada ha estado respaldada por la realización de: 4 Proyectos internacionales de cooperación científica con una institución de elite mundial (Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería - CIMNE - ) en la temática de métodos numéricos, 4 Proyectos nacionales en ejecución, 9 Proyectos internacionales concluidos, 7 Proyectos internacionales en ejecución, 9 Proyectos Europeos en ejecución donde participan los investigadores cubanos que forman parte de la propuesta de premio (Anexo VI). En este último caso la participación no es directa ya que son proyectos para centros europeos, pero como parte de los convenios existentes entre UnB - CUJAE y UCLV y UCLV – CIMNE, se incluyen en los mismos los investigadores de Cuba (Anexo VI). Como parte de las acciones de estos proyectos, los desarrollos establecidos en esta investigación han sido aplicados a la resolución de diversos problemas de ingeniería. En el trabajo se reportan como aspecto significativo 37 publicaciones en revista del Grupo I y 17 publicaciones en otros tipos de revistas (Anexo IV). Además se han publicado en memorias de congresos de relevancia internacional 58 publicaciones (Anexo IV). Colateralmente en congresos internacionales en Cuba se ha reportado 18 publicaciones (Anexo IV). Adicionalmente se han efectuado 3 monografías y 2 reportes técnicos (Anexo IV), a lo que se le une todos los reportes de proyectos nacionales e internacionales elaborados (Anexo VI). Adicionalmente como parte del trabajo se ha desarrollado diversas investigaciones científicas que han culminado con 17 trabajos de diploma, 13 Tesis de Maestría y 12 Tesis doctorales (Anexo V). El trabajo presenta avales de varias universidades del país, de empresas cubanas y de otras entidades académicas y científicas internacionales. Se destaca dentro de los avales presentados algunos emitidos, por personalidades mundiales en la temática (ver apartados de avales).

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, MPM y DEM). Estos resultados le han permitido a Cuba estar representado como miembro de comité científico del congreso “Particle” de la Asociación internacional de Mecánica Computacional (IACM), de conjunto con instituciones científicas y académicas emblemáticas de elite mundial (Anexo VII).





**Aportaciones por Instituciones:**

Centro (Organizado por Orden Alfabético)	Contribuciones	Aportes
1. Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (DCMTRANS), La Habana, Cuba.	Aplicación de DEM en la modelación de problemas de balística de efecto y blindaje. Aplicaciones de las tecnologías desarrolladas en función del proyecto Tarea Triunfo.	2.31 %
2. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, España.	Desarrollo de las formulaciones de DEM acopladas con FEM y PFEM. Aplicaciones de la formulación genérica del DEM desarrollada en la UCLV. Participación en varios proyectos de cooperación científica, nacionales e internacionales.	29.49 %
3. Empresa Vértices. Holguín. Cuba	Aplicación de los métodos numéricos de partículas (MPM, SPH y DEM) la modelación dinámica de estructuras y el terreno. Aplicaciones Estructurales.	1.54 %
4. Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.	Aplicación de los métodos numéricos de partículas (MPM, SPH y DEM) en modelación de problemas geomecánicos y modelación de pavimentos. Participación en varios proyectos nacionales e internacionales.	3.08 %
5. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Santa Clara, Cuba.	Desarrollo de la formulación genérica del DEM. Desarrollo del DEM para problemas acoplados de multifísica incluyendo efectos de mutiescala. Formulación de modelos constitutivos de contacto y estimación de parámetros. Establecimiento de todas las formulaciones desarrolladas en el método SPH. Aplicaciones del método MPM en la solución de problemas de geomecánica. Participación en varios proyectos de cooperación científica, nacionales e internacionales.	30.01 %
6. Universidad Católica de Lovaina, Leuven, Bélgica.	Desarrollo de las formulaciones del método SPH. Aplicación del método de elementos Discretos a problemas de agricultura. Participación en varios proyectos internacionales.	4.85 %
7. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.	Aplicación del método de elementos Discretos a problemas de agricultura. Participación en varios proyectos nacionales e internacionales.	1.54 %
8. Universidad de Brasilia (UnB), Brasilia, Brasil.	Desarrollo de las formulaciones del método MPM. Aplicaciones del método MPM en problemas de geomecánica. Formulación y aplicación del método SPH para problemas de erosión de suelos. Aplicación del DEM a problemas geotécnicos. Desarrollo de ensayos físico mecánicos de materiales granulares para el desarrollo del DEM. Participación en varios proyectos internacionales.	21.79 %
9. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.	Aplicación del método de elementos Discretos a problemas de agricultura. Participación en varios proyectos nacionales e internacionales.	3.08 %
10. Universidad Federal de Goiás, Brasil	Aplicación del DEM a problemas de pavimentación. Desarrollo de ensayos físico mecánicos de materiales granulares para el desarrollo del DEM. Participación en varios proyectos internacionales.	0.77 %
11. Universidad Federal de Tocantins, Brasil	Desarrollo de las formulaciones del método MPM. Aplicaciones del método MPM en problemas de geomecánica. Participación en varios proyectos internacionales.	0.77 %
12. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador.	Aplicación del método de elementos Discretos DEM a problemas de agricultura. Participación en varios proyectos internacionales.	0.77 %





**Aportaciones por Autores:**



**Resumen de contribuciones por autores:**

<b>Autores (organizados por orden alfabético)</b>	<b>% Participación</b>
<b>Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (DCMTRANS), La Habana, Cuba.</b>	
1. Antonio Jesús Linares Alfonso	0.77 %
2. Eduardo Sánchez Hernández	0.77 %
3. Julio Antonio Álvarez Rodríguez	0.77 %
<b>Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, España.</b>	
4. Alberto Ferriz Canals	0.77 %
5. Antonia Larese de Tetto	0.77 %
6. Benjamín Suarez Arroyo	0.77 %
7. Carlos Labra González	0.77 %
8. Debanjan Mukherjee	0.77 %
9. Eva Balsa	0.77 %
10. Eugenio Oñate Ibañez de Navarra (Coordinador Científico por España)	1.00 %
11. Fernando Salazar González	0.77 %
12. Ferran Arrufat Garcia	0.77 %
13. Francisco Zárate Araiza	0.77 %
14. Gerardo Socorro Mirandas	0.77 %
15. Guillermo Casas González	0.77 %
16. Hubert Kargl	0.77 %
17. Ignasi de Pouplana Sardà	0.77 %
18. Ilaria Iaconeta	0.77 %
19. Jerzy Rojek	0.77 %
20. Jan Akerman	0.77 %
21. Joaquín Irazábal González	0.77 %
22. Jorge Suit Pérez	0.77 %
23. Josep María Carbonell Puigbó	0.77 %
24. Juan Miquel Canet	0.77 %
25. Kedar Mukund Deshpande	0.77 %
26. Khaydar Valiullin	0.77 %
27. Lev Ring	0.77 %
28. Mercé López Núñez	0.77 %
29. Miguel Ángel Celigueta Jordana	0.77 %
30. Miguel Enrique Cerrolaza Rivas	0.77 %
31. Miquel Santasusana Isach	0.77 %
32. Okan Su	0.77 %
33. Oscar Frutos Bickham	0.77 %
34. Pere-Andreu Ubach de Fuentes	0.77 %
35. Peter Wriggers	0.77 %
36. Riccardo Rossi	0.77 %
37. Salvador Latorre Sánchez	0.77 %
38. Sara Burel Diez	0.77 %
39. Sergio Idelsöhn Barg	0.77 %
40. Tarek I. Zohdi	0.77 %
41. Uwe Restner	0.77 %
42. Varadaraju (Raju) Gandikota	0.77 %
<b>Empresa Vértices. Holguín. Cuba</b>	
43. Dalia Pupo Ordoño	0.77 %
44. Víctor Manuel Valdés Jiménez	0.77 %
<b>Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba</b>	
45. Eduardo Tejeda Piusseaut	0.77 %
46. Félix Michael Hernández López	0.77 %
47. Janet Otmara Martínez Cid	0.77 %
48. Milena Mesa Lavista	0.77 %
49. William Cobelo Cristiá	
<b>Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba.</b>	
50. Alcides Viamontes Esquivel	0.77 %



51. Alejandro Duffus Scott	0.77 %
52. Álvaro J. Fuentes Suárez	0.77 %
53. Carlos A. Recarey Morfa (Coordinador Científico General)	1.82 %
54. Ciro Iglesias Coronel	0.77 %
55. Denis Deniz Gonzalez	0.77 %
56. Eduardo Miguel Fírvida Donéstevez	0.77 %
57. Elvis López Bravo	0.77 %
58. Enrique Gonzalez Martin	0.77 %
59. Ernesto Chagoyen Méndez	0.77 %
60. Gilberto Quevedo Sotolongo	0.77 %
61. Gilles Cadoce	0.77 %
62. Harold Díaz-Guzman Casañas	0.77 %
63. Heikel Yervilla Herrera	0.77 %
64. Irvin Pablo Pérez Morales (Coordinador Científico por Cuba)	1.82 %
65. Ismay Pérez Sánchez	0.77 %
66. Laura Pérez Triana	0.77 %
67. Lucía Argüelles Cortés	0.77 %
68. Manuel A. Castro Fuentes	0.77 %
69. Marcelino Rodríguez Cancio	0.77 %
70. Maykel Bermúdez Casanova	0.77 %
71. Omar González Cueto	0.77 %
72. Raimel Santos Rubio	0.77 %
73. Raúl González López	0.77 %
74. Roberto Roselló Valera	1.54 %
75. Sergio Betancourt Rodríguez	0.77 %
76. Thien Dinh Duc	0.77 %
77. Yaidel Muñoz Acosta	0.77 %
78. Yaidel Reyes López	0.77 %
79. Yordanis Pérez Brito	0.77 %
80. Yunier Pérez Camacho	0.77 %
81. Yoandry Socarrás Armentero	0.77 %
82. Jorge Daniel López Morfa	0.77 %
<b>KU Leuven (Universidad Católica de Lovaina), Leuven, Bélgica.</b>	
83. Bart Smeets	0.77 %
84. Dirk Roose (Coordinador Científico por Bélgica)	1.00 %
85. Herman Ramon	0.77 %
86. Simon Vanmaercke	0.77 %
87. Engelbert Tijskens	0.77 %
88. Ha Hong Bui	0.77 %
<b>Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.</b>	
89. Ángel Lázaro Sánchez Iznaga	0.77 %
90. Reinaldo Pérez Armas	0.77 %
<b>Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil.</b>	
91. Alfred Septian	0.77 %
92. Benedict Rogers	0.77 %
93. Bernardo Cascão Pires e Albuquerque	0.77 %
94. Bruna Mota Mendes Silva Tedesco	0.77 %
95. Bruno Rogério da Hora Lôbo	0.77 %
96. Carlos Eduardo Veras Neves	0.77 %
97. Cristhian Mendoza	0.77 %
98. Daichao Sheng	0.77 %
99. David J. Williams	0.77 %
100. Dorival M. Pedroso	0.77 %
101. Elizabeth Hernández Zubeldia	0.77 %
102. Gabriel Jaime Zapata Guerra	0.77 %
103. Georgios Fourtakas	0.77 %
104. Hernán Martínez Carvajal	0.77 %
105. Jhon F. Romaña García	0.77 %
106. John Nairn	0.77 %
107. Jorge E. Alarcón	0.77 %
108. José Ricardo Girardi Júnior	0.77 %
109. Luis David Medina Chaparro	0.77 %
110. Manoel Porfírio Cordão Neto	0.77 %

# PROPUESTA DE PREMIO DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA



111. Marc R. Ruest	0.77 %
112. Marcelo Llano Serna	0.77 %
113. Márcio Muñiz de Farias (Coordinador Científico por Brasil)	1.00 %
114. Oisy Menéndez	0.77 %
115. Renato Pinto da Cunha	0.77 %
116. Robinson Andrés Giraldo Zuluaga	0.77 %
117. Teruo Nakai	0.77 %
118. Yamile Valencia González.	0.77 %
<b>Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez. Ciego de Ávila, Cuba.</b>	
119. Jorge D. Bonilla Rochas	0.77 %
120. Rigoberto A. Pérez Reyes	0.77 %
121. Aníbal Sánchez Numa	0.77 %
122. Gilberto Rodríguez Plasencia	0.77 %
<b>Universidad Federal de Goiás (UFG). Brasil</b>	
123. Liosber Medina García	0.77 %
<b>Universidad Federal de Tocantins (UFT). Brasil.</b>	
124. Raydel Lorenzo Reinaldo	0.77 %
<b>Universidad Técnica de Manabí. Ecuador.</b>	
125. Miguel Herrera Suárez (Coordinador Científico por Ecuador)	1.00 %






Aportes por cada Autor	Aportes Teóricos	Publicación	Participación Proyectos
<b>Autores (Organizados por orden alfabético e instituciones):</b>			
<b>Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte</b>			
Antonio Jesús Linares Alfonso			X
Eduardo Sánchez Hernández			X
Julio Antonio Álvarez Rodríguez			X
<b>Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería</b>			
Alberto Ferriz Canals			X
Antonia Larese de Tetto		X	X
Benjamín Suarez Arroyo			X
Carlos Labra González		X	X
Debanjan Mukherjee		X	X
Eva Balsa		X	X
Eugenio Oñate Ibañez de Navarra	X	X	X
Fernando Salazar González		X	X
Ferran Arrufat García	X	X	X
Francisco Zárate Araiza		X	X
Gerardo Socorro Mirandas			X
Guillermo Casas González		X	X
Hubert Kargl		X	X
Ignasi de Pouplana Sardà	X		X
Ilaria Iaconeta		X	X
Jerzy Rojek	X	X	X
Jan Akerman		X	X
Joaquín Irazábal González	X	X	X
Jorge Suit Pérez		X	X
Josep María Carbonell Puigbó		X	X
Juan Miquel Canet	X	X	X
Kedar Mukund Deshpande		X	X
Khaydar Valiullin		X	X
Lev Ring		X	X
Mercé López Núñez			X
Miguel Ángel Celigueta Jordana	X	X	X
Miguel Enrique Cerrolaza Rivas		X	X
Miquel Santasusana Isach	X	X	X
Okan Su		X	X
Oscar Fruitos Bickham			X
Pere-Andreu Ubach de Fuentes		X	X
Peter Wriggers		X	X
Riccardo Rossi		X	X
Salvador Latorre Sánchez	X	X	X
Sara Burrell Diez	X	X	X
Sergio Idelsöhn Barg	X	X	X
Tarek I. Zohdi		X	X
Uwe Restner		X	X
Varadaraju (Raju) Gandikota		X	X

# PROPUESTA DE PREMIO DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA



<div> <b>Empresa Vértices. Holguín. Cuba</b> </div>			
Dalia Pupo Ordoño			X
Víctor Manuel Valdés Jiménez			X
<div> <b>Universidad Tecnología de La Habana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Facultad de Ingeniería Civil</b></li> </ul> </div>			
Eduardo Tejeda Piusseaut			X
Félix Michael Hernández López			X
Janet Otmara Martínez Cid			X
Milena Mesa Lavista			X
William Cabelo Cristiá			X
<div> <b>Universidad Central de Las Villas.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Centro de Investigaciones Agropecuarias.</b></li> <li>• <b>Centro de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería.</b></li> <li>• <b>Facultad de Construcciones</b></li> <li>• <b>Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial</b></li> <li>• <b>Facultad de Matemática Física y Computación</b></li> </ul> </div>			
Alcides Viamontes Esquivel		X	X
Alejandro Duffus Scott			X
Álvaro J. Fuentes Suárez		X	X
Carlos A. Recarey Morfa	X	X	X
Ciro Iglesias Coronel		X	X
Denis Deniz Gonzalez			X
Eduardo Miguel Fírvida Donéstevez			X
Elvis López Bravo	X	X	X
Enrique Gonzalez Martin			X
Ernesto Chagoyen Méndez			X
Gilberto Quevedo Sotolongo		X	X
Gilles Cadoce	X	X	X
Harold Díaz-Guzman Casañas		X	X
Heikel Yervilla Herrera	X	X	X
Irvin Pablo Pérez Morales	X	X	X
Ismay Pérez Sánchez	X	X	X
Laura Pérez Triana			X
Lucía Argüelles Cortés	X	X	X
Manuel A. Castro Fuentes	X		X
Marcelino Rodríguez Cancio			X
Maykel Bermúdez Casanova		X	X
Omar González Cueto		X	X
Raimel Santos Rubio	X		X
Raúl González López			X
Roberto Roselló Valera	X	X	X
Sergio Betancourt Rodríguez	X	X	X
Thien Dinh Duc	X	X	X
Yaidel Muñoz Acosta			X
Yaidel Reyes López	X	X	X
Yordanis Pérez Brito	X	X	X
Yunier Pérez Camacho			X
Yoandry Socarrás Armentero		X	X
Jorge Daniel López Morfa		X	X
<div> <b>KU Leuven (Universidad Católica de Lovaina)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Departamento de Biosistemas</b></li> <li>• <b>Departamento de Ciencia de la Computación</b></li> </ul> </div>			
Bart Smeets			X
Dirk Roose	X	X	X
Herman Ramon		X	X
Simon Vanmaercke		X	X
Engelbert Tijskens		X	X
Ha Hong Bui		X	X
<div> <b>Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Facultad de Ciencias Agrarias</b></li> </ul> </div>			
Ángel Lázaro Sánchez Iznaga	X	X	X
Reinaldo Pérez Armas		X	X
<div> <b>Universidad de Brasilia (UnB).</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Facultad de Tecnología (FT),</b></li> <li>• <b>InfraLab</b></li> </ul> </div>			
Alfred Septian		X	X
Benedict Rogers		X	X
Bernardo Cascão Pires e Albuquerque	X		X
Bruna Mota Mendes Silva Tedesco	X		X
Bruno Rogério da Hora Lôbo			X
Carlos Eduardo Veras Neves	X	X	X



Cristhian Mendoza		X	X
Daichao Sheng		X	X
David J. Williams	X	X	X
Dorival M. Pedroso	X	X	X
Elizabeth Hernández Zubeldia	X	X	X
Gabriel Jaime Zapata Guerra			X
Georgios Fourtakas		X	X
Hernán Martínez Carvajal	X	X	X
Jhon F. Romaña García			X
John Naim		X	X
Jorge E. Alarcón			X
José Ricardo Girardi Júnior	X		X
Luis David Medina Chaparro	X		X
Manoel Porfírio Cordão Neto	X	X	X
Marc R. Ruest		X	X
Marcelo Llano Serna	X	X	X
Márcio Muñiz de Fariás	X	X	X
Oisy Menéndez		X	X
Renato Pinto da Cunha		X	X
Robinson Andrés Giraldo Zuluaga	X	X	X
Teruo Nakai	X	X	X
Yamile Valencia González.			X
 <b>Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez</b> <b>• Facultad Ciencias Técnicas</b>			
Jorge D. Bonilla Rochas			X
Rigoberto A. Pérez Reyes			X
Aníbal Sánchez Numa			X
Gilberto Rodríguez Plasencia			X
 <b>Universidad Federal de Goiás (UFG). Brasil</b>			
Liosber Medina García	X	X	X
 <b>Universidad Federal de Tocantins (UFT). Brasil.</b>			
Raydel Lorenzo Reinaldo	X	X	X
 <b>Universidad Técnica de Manabí. Ecuador.</b> <b>• Instituto de Investigaciones Científicas, Desarrollo y Transferencias de Tecnología.</b>			
Miguel Herrera Suárez	X	X	X
 <b>Colaboradores: 9 (Organizados por orden alfabético)</b>			
César A. Chagoyen Méndez (UCLV)			X
Eduardo Soudah (CIMNE)			X
Gregorio Aragón López (MITRASN)			X
Lisbeidy Guzmán Subiaurria (UCLV)	X		X
Rodys Cesar Chao Sanchez	X		X
William Felipe Prieto (UCLV)	X		X
Yusnel Rojas García (UCLV)	X		X

**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 K 5 ½ Santa Clara, Villas Clara, Cuba

Tel. 53-42-282014 Email: [recarey@uclv.edu.cu](mailto:recarey@uclv.edu.cu)

## Antecedentes

En el año 2016 se otorgó por parte de la Academia de Ciencias de Cuba, un premio anual al trabajo titulado: “*Desarrollo de tecnologías de avanzada para la generación y empaquetamiento de partículas enfocadas al método de los elementos discretos*”, en el mismo se desarrollaron diferentes contribuciones al desarrollo del método de partículas (en específico al Método de los Elementos Discretos - DEM), en este caso los aportes estaban centrados en la temática de generación de mallas de partículas.

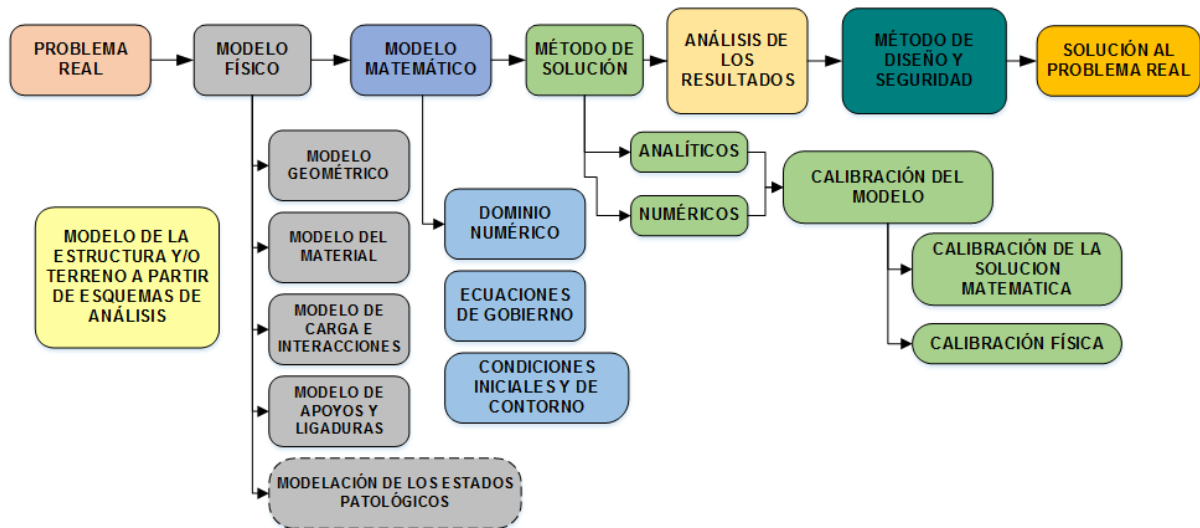


Figura 1: Esquema general sobre la concepción de la modelación

La solución de los problemas de ingeniería se establece por diversos modelos. En este sentido la concepción general de la modelación, incluyen: modelos físicos, modelos matemáticos, métodos de solución (analíticos y numéricos), análisis de resultados y métodos de diseño entre otros elementos (Figura 1). Por su parte los métodos numéricos para su aplicaciones presentan una seria de etapas: pre-proceso (generación de mallas o discretización del dominio), simulación física (aplicación de métodos numéricos sobre una región que se rige por unas ecuaciones de gobierno y presentan unas condiciones iniciales o de fronteras) y la etapa final que es la de post-proceso donde se visualizan e interpretan los resultados (Figura 2).

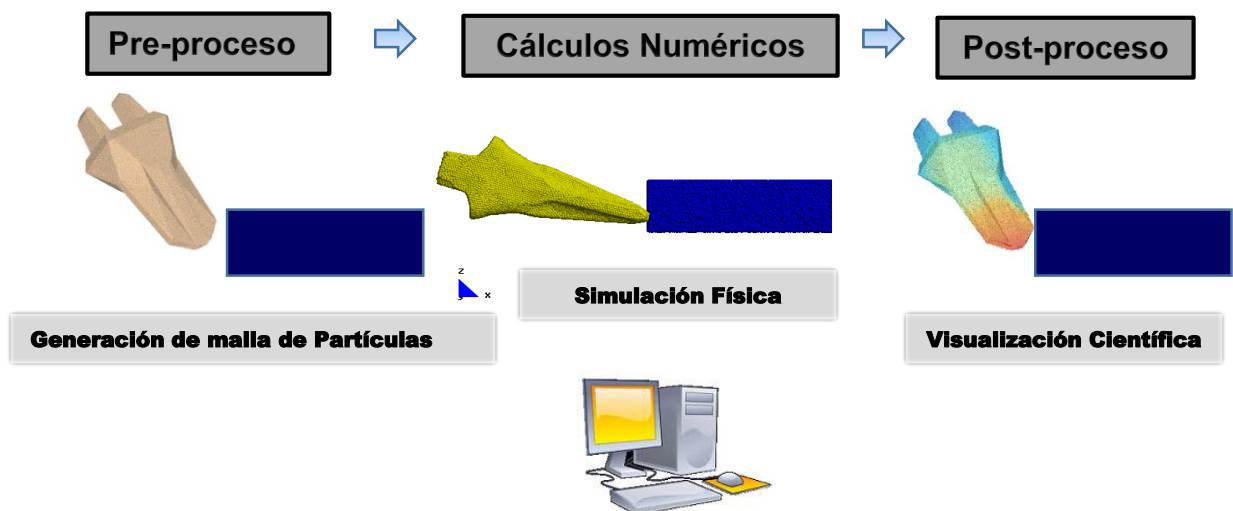


Figura 2: Etapas de la modelación numérica



El premio nacional de la Academia de Ciencias de Cuba recibido en el 2016, se centró principalmente en el desarrollo de técnicas numéricas para la discretización del medio (técnicas de generación de partículas). Estas aportaciones están relacionadas con el modelo físico (Figura 1) y en particular con el modelo geométrico (Figura 1) con énfasis en la generación de las mallas de partículas a diferentes escalas de la mecánica computacional. Este aspecto incluyó la formulación de un método de generación de mallas de partículas y se desarrollaron técnicas de evaluación de la calidad de los empaquetamientos, unidos a la obtención geométrica de estructuras de materiales a escala micro. Todos los desarrollos efectuados en el premio del 2016 se centran en cuestiones geométricas para la obtención de las mallas iniciales de partículas, para la aplicación del método de los elementos discretos. Dentro de los resultados científicos más relevantes del trabajo premiado por la Academia de Ciencias de Cuba en el 2016, se pueden mencionar:

1. Desarrollo y formulación de técnicas de generación de partículas de formas diversas incluidas geometrías arbitrarias reales, las cuales se obtienen empleando descriptores de Fourier y otras técnicas.
2. Formulación de técnicas de caracterización y evaluación de la calidad de las mallas de partículas en cuanto a: nivel de ocupación del espacio, homogeneidad, isotropía, nivel de conectividad, caracterización de la forma y dimensiones de las partículas, incluido la relación de aspectos.
3. Formulación de técnicas de generación de partículas esféricas acoplado con algoritmos de Laguerre para la obtención de microestructuras de materiales continuos como: estructuras policristalinas de aceros, aceros nano-estructurados y rocas, entre otros materiales, lográndose modelar de forma virtual la microestructura de materiales reales.
4. Análisis micro-estructural de aceros al carbono: Desarrollo de un procedimiento automatizado de análisis de las micrografías de aceros para identificar parámetros estructurales utilizando técnicas de procesamiento de imágenes.
5. Aplicación de las formulaciones en diversos proyectos de investigación nacional e internacional.

La propuesta de premio *“Desarrollo de tecnologías numéricas de avanzada para la modelación de problemas de ingeniería: Contribuciones a los Métodos SPH, MPM y DEM”*, que se presenta a la convocatoria de la Academies de Ciencias de Cuba en el 2017, realiza contribuciones marcadas al desarrollo de los métodos de partículas (MPM, SPH y DEM). En este caso las aportaciones no se centran en cuestiones geométricas y de generación de mallas, que se efectúan en la etapa de pre-proceso (Figura 2) (generación de mallas o discretización del dominio), sino en la etapa de simulación física (Figura 2). La simulación física, es donde se aplica un método numérico para la solución del modelo matemático establecido (Figura 1). Este modelo queda definido por una región que se rige por unas ecuaciones de gobierno y presentan unas condiciones iniciales o de fronteras.

En particular en esta propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba del 2017, se efectúan aportaciones al desarrollo de los métodos de partículas y en especial a:

- ✚ Método de Punto Material (MPM).
- ✚ Método de Hidrodinámica de partícula suavizada (SPH).
- ✚ Método de los Elementos Discretos (DEM)

Las principales contribuciones a la modelación física (Figura 1 y 2), que se reporta en el presente trabajo son:





#### MPM

- Formulación del método de punto material (MPM) para la solución de problemas geomecánicos, donde esté presente problemas de grandes deformaciones. Inclusión en estas formulación (MPM) de 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. Las contribuciones a este método, son aspectos que presentan relevancia internacional, porque son aspectos muy novedosos que se reportan para el caso de modelación de problemas geomecánicos.

#### SPH

- Formulación del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para la modelación de problemas de sólidos con grandes deformaciones. Formulación multifísica acopada (fluido-sólido) del método de hidrodinámica suavizada de partículas (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 computacional del método SPH y se hacen las validaciones correspondientes. Se resuelven problemas de grandes deformaciones y de erosión de suelos no resueltas con fiabilidad por los métodos convencionales. Se aplican las formulaciones realizadas en los proyectos nacionales e internacionales que se ejecutan o culminaron. Las contribuciones aportadas a este método son aspectos que presenta relevancia internacional porque son las primeras que se reportan para el caso de modelación de sólidos y problemas multifísicos (acoplamiento de sólidos y fluidos).

#### DEM

- Formulación genérica del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional. Adicionalmente se efectúa una formulación multi-física del método de los elementos discretos para enfrentar problemas acoplados: termo-mecánico acoplados, incluido simulación de problemas de desgastes. Se desarrollan nuevos modelos constitutivos de contacto para describir diversos tipos de materiales. Se efectúa una formulación acoplada del método de los elementos finitos (MEF) con el DEM. De igual forma se acopla el método de los elementos finitos de puntos (PFEM) con DEM. Se efectúa la implementación computacional y su correspondiente validación. 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 diferentes problemas que se ejecutan en los diferentes proyectos nacionales e internacionales. Las contribuciones aportadas a este método son aspectos que presenta relevancia internacional porque son las primeras que se reportan para el caso de formulación genérica del DEM y la modelación multifísica acoplada en dicho método. De igual modo el acoplamiento del DEM con los métodos FEM y PFEM tienen la misma significación en cuanto a aportes de carácter internacional.

Después de haber explicado las aportaciones del trabajo premiado por la Academia de Ciencias de Cuba en el 2016 y el que se presenta como propuesta a premio en el 2017, se deja claras las contribuciones y aportes en cada caso, demostrándose que son dos trabajos completamente diferentes que abordan diferentes fases de los problemas de modelación de problemas de ingeniería.



## Comunicación Corta.

El hombre, a lo largo de los años 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 éste 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 la circunstancia 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 Método de punto material (MPM), Hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) y el método de los elementos discretos (DEM) o elementos distintos, como también se le conoce. Los métodos de partículas (MPM, SPH, 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 a 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 y en la actualidad, hasta la escala microscópica. Todo trabajo investigativo que intente el estudio del macro, meso y el micro-mundo y sus leyes de comportamiento es una tarea de constante investigación y es precisamente en esta 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 eso el objetivo primordial del presente trabajo que 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 los métodos MPM, SPH y DEM. 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) elasto-plásticos 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.
- Validación de las implementaciones numérica y computacional realizadas al método MPM enfocado a la resolución de problemas geotécnicos y geomecánicos.
- 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 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. El método SPH se concibió inicialmente para resolver problemas de fluido.
- Formulación multi-física (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 elasto-plásticos 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.)

#### **DEM**

- Formulación genérica (multiescala) del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional.
- Formulación multi-física del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas acoplados: termo-mecánico acoplados incluido 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 efectúa 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 estos 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.)

**Nota aclaratoria:** En el caso del método de los elementos discretos (DEM) no se incluyen los aportes realizados en los temas de: 1 - Generación de partículas, 2 - Evaluación de la calidad de las mallas de partículas, 3 – Generación geométrica de estructuras micro de materiales, ya que estos trabajos recibieron en el 2016 el premio Anual de la Academia de Ciencias.

Los resultados relacionados con el método de MPM se describen sintéticamente en los diferentes apéndices del Anexo I. Por su parte las contribuciones desarrolladas al método SPH se evidencian resumidamente en los apéndices del Anexo II y en el caso del método de elementos discretos (DEM) se detallan sintéticamente algunas de las contribuciones efectuadas en los apéndices del Anexo III. Una descripción más detallada de estos resultados se pueden encontrar en las diferentes publicaciones efectuadas y en las tesis (tesis de grado, maestría y doctorado) realizadas y en los informes de proyectos emitidos. Con la finalidad de disponer de un mayor grado de detalles se han efectuado un grupo de anexos complementarios.

La divulgación de los resultados en congresos y revistas de relevancia internacional y otras de menor categoría se pueden encontrar organizadas por grupos en el Anexo IV. Las diferentes tesis de diploma, maestría y doctorado, donde se efectuaron los principales aportes científicos que forman parte de la propuesta de premio se encuentran en el Anexo V. 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 UCLV, UnB, K. U Leuven y CIMNE. Las aplicaciones de los resultados científicos alcanzado se han materializado en los diferentes proyectos nacionales e internacionales donde han participado o participan los autores de la presente propuesta de premio (Anexo VI).

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 (Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería - CIMNE - ) en la temática de métodos numéricos, 4 Proyectos nacionales en ejecución, 9 Proyectos internacionales concluidos, 7 Proyectos internacionales en ejecución, 9 Proyectos Europeos en ejecución donde participan



los investigadores cubanos que forman parte de la propuesta de premio (Anexo VI). 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-UCLV y UCLV – CIMNE, se incluyen en los mismos la participación de los investigadores de Cuba (Anexo VI). En estos proyectos se hace uso de las diferentes contribuciones desarrolladas a los métodos de partículas (MPM, SPH y DEM). 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 reportan como aspecto significativo 37 publicaciones en revista del Grupo I y 17 publicaciones en otros tipos de revistas (Anexo IV). Además se han publicado en memorias de congresos de relevancia internacional 58 publicaciones (Anexo IV). Colateralmente en congresos internacionales en Cuba se ha reportado 18 publicaciones (Anexo IV). Adicionalmente se han efectuado 3 monografías y 2 reportes técnicos (Anexo IV), a lo que se le une todos los reportes de los proyectos nacionales e internacionales elaborados (Anexo VI).
- Adicionalmente como parte del trabajo se ha desarrollado diversas investigaciones científicas que han culminado con 17 trabajos de diploma, 13 Tesis de Maestría y 12 Tesis doctorales (Anexo V).
- El trabajo presenta avales de varias universidades del país, de empresas cubanas y de otras entidades académicas y científicas internacionales. Se destaca dentro de los avales presentados algunos emitidos, por personalidades mundiales en la temática (ver apartados de avales).

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, MPM y DEM). Estos resultados le han permitido a Cuba estar representado como miembro de comité científico del congreso “*Particle*” de la *Asociación internacional de Mecánica Computacional* (IACM), de conjunto con instituciones científicas y académicas emblemáticas a nivel mundial (Anexo VII).





## Descripción científica detallada del resultado

### 1.0 - Aspectos generales

El trabajo “*Desarrollo de tecnologías numéricas de avanzada para la modelación de problemas de ingeniería: Contribuciones a los Métodos SPH, MPM y DEM*”, es el resultado científico técnico de un colectivo de autores de varias instituciones académicas, productivas y de investigación, tanto de Cuba como del extranjero, que durante varios años (más de 10 años) han realizado aportaciones novedosas y relevantes al campo de la ciencia que se relaciona con la mecánica computacional y los métodos numéricos en la ingeniería.

El trabajo se centra con especial énfasis en el desarrollo de tecnologías de avanzada de modelación numérica con métodos de partículas. Las principales contribuciones al desarrollo de los métodos numéricos están en los métodos de punto material (MPM), método de hidrodinámica de partículas (SPH) y el método de los elementos discretos (DEM). En este sentido se hacen una serie de aportes significativos al campo de la ciencia (Anexo I, II y III) y se efectúan su divulgación (Anexo IV) científica en publicaciones de prestigio internacional. Los resultados han sido generados como parte de varios proyectos nacionales e internacionales (Anexo VI) y se ha reportado la formación científica de varios profesionales (Anexo V).

Las principales aportaciones al desarrollo de los diferentes métodos de partículas: Método de Punto Material (MPM), Método de Hidrodinámica de partícula suavizada (SPH) y Método de los Elementos Discretos (DEM), se centra en el establecimiento de nuevas formulaciones al caso de problemas de mecánica de sólidos (énfasis a problemas de geotecnia y geomecánica) y el acoplamiento del mismo para resolver problemas de multi-física (problemas termo-mecánico acoplado y fluido/sólido en un mismo dominio o dominios diferentes – interacción fluido sólido -) y multi-escala. Otro aspecto significativo es el establecimiento de nuevas formulaciones de acoplamientos entre métodos (FEM/DEM, PFEM/DEM) aspectos que se reportaron por los autores de este premio por primera vez a nivel mundial. Se debe destacar que en la gran mayoría de los métodos están enfocados a resolver problemas de grandes deformaciones y de discontinuidades no resueltas fiablemente por los métodos convencionales (Diferencia Finita, Volúmenes Finitos, Elementos Finitos, Elementos de Contorno, etc.). Las contribuciones efectuadas por cada uno de los métodos (MPM, SPH y DEM) se detallan a continuación:

#### 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.). 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) elasto-plásticos 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.
- Validación de las implementaciones numérica y computacional realizadas al método MPM enfocado a la resolución de problemas geotécnicos y geomecánicos.



- 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 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. El método SPH se concibió inicialmente para resolver problemas de fluido.
- Formulación multi-física (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 elasto-plásticos 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.)

#### DEM

- Formulación genérica (multiescala) del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional.
- Formulación multi-física del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas acoplados: termo-mecánico acoplados incluido 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 efectúa 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 estos 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.)

**Nota aclaratoria:** En el caso del método de los elementos discretos (DEM) no se incluyen los aportes realizados en los temas de: 1 - Generación de partículas, 2 - Evaluación de la calidad de las mallas de partículas, 3 – Generación geométrica de estructuras micro de materiales, ya que estos trabajos recibieron en el 2016 el premio Anual de la Academia de Ciencias.

## **2.0 - Método de punto material (MPM) en la solución de problemas geotécnicos y geomecánicos.**

En ingeniería geotecnica existen muchos casos donde se presentan problemas asociados a grandes deformaciones, algunos de estos son las avalanchas, excavaciones, ensayos de campo que involucren penetración, hincado de elementos en la masa de suelos. En los últimos años el método de elementos finitos (FEM) se ha convertido en la herramienta estándar para la solución de la mayoría de los problemas en mecánica de sólidos. Sin embargo, este método, en su formulación Lagrangiana tradicional, no es muy adecuado para el análisis de grandes deformaciones. Es justo destacar que la solución de los problemas mencionados en algunos casos no se puede resolver por el FEM y en otros su solución no es fiable. Para superar las dificultades de FEM en la simulación de grandes deformaciones, han sido desarrollados los llamados métodos de partículas, para los cuales la generación de los modelos matemáticos se reduce a la generación de puntos o partículas y su distribución, no existiendo conectividades fijas entre ellos como en el método de elementos finitos. Entre estos métodos se incluyen, el método de elementos discretos, métodos “*Smooth particle hydrodynamics*” - SPH -, métodos de partículas en celdas (PIC) y el método de elementos finitos sin malla. Una alternativa similar a los métodos de celdas es la formulación establecida en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE) denominado método de elementos finitos de puntos (PFEM).

El método del punto material (MPM) es un método de tipo PIC. Este combina ideas y procedimientos de los métodos de partícula y del método de elementos finitos. Su génesis fue desarrollado de las ideas de un método conocido como *Fluid Implicit Particle* que fue aplicado a problemas de fluidos, siendo el método del punto material (MPM) una extensión de este, para el caso de mecánica de sólidos que inicialmente no tenía prevista su formulación para problemas geomecánicos y geotécnicos en grandes deformaciones. Es por ello que en la presente propuesta de premio ha sido implementado este método para problemas de geomecánica y geotecnica en grandes deformaciones. Desde el punto de vista constitutivo se desarrollan dos modelos constitutivos para suelos basados en la teoría de estados críticos para grandes deformaciones enfocados al método MPM. Todos los desarrollos teóricos son implementados en un código abierto. Este código conocido como NairnMPM, ha sido desarrollado para la modelación de sólidos enfocados a problemas de Ingeniería Estructural. Las adaptaciones y formulación de MPM para problemas de geomecánica realizadas en esta propuesta de premio de la ACC 2017, han permitido la utilización de este en problemas geotécnicos de grandes deformaciones y penetración entre cuerpos, entre otros aspectos no resueltos por los métodos numéricos convencionales.

Una de las aplicaciones fundamentales que se han realizado utilizando el código y los modelos constitutivos formulados e implementados son los problemas de instalación de cimentaciones profundas de tipo pilote. El efecto de instalación de los pilotes en el suelo es conocido físicamente, pero su cálculo es difícil desde el punto de vista numérico por causa de la interacción entre el suelo y el pilote, las grandes deformaciones que se generan alrededor del pilote durante su penetración y los bruscos cambios de tensiones que aparecen en el suelo. En esta investigación fueron realizadas simulaciones de la hincada de pilotes tanto en suelos friccionales como en suelos cohesivos. Estas simulaciones han sido validadas contrarrestando los resultados con ensayos a escala reducida y con



métodos analíticos. Además de esto, ha sido realizado un estudio de la variación del coeficiente de empuje del suelo durante la hinca del pilotes. Este parámetro es indispensable para el cálculo de la capacidad de carga de pilotes por métodos analíticos. Importantes conclusiones han sido obtenidas acerca de la variabilidad del empuje en el suelo por la instalación de los pilotes. Finalmente ha sido realizado un análisis paramétrica sobre el cambio en la capacidad de carga de pilotes. Varios tipos de suelo y geometría de pilotes han sido considerados.

Otro de los problemas geotécnicos estudiados con la formulación establecida con MPM son la modelación de los ensayo de penetración (laboratorio y campo) y deslizamientos de taludes y laderas, donde también se manifiestan problemas con grandes deformaciones. Dentro de las investigaciones realizadas se encuentran la modelación de los ensayos de campo: SPT, CPT, DMT; y los ensayos de laboratorio: ensayo de penetración de cono y el ensayo de veleta. Inicialmente, fueron ejecutados algunos ensayos de caracterización de la resistencia mecánica de muestras de caolín. El programa de ensayos incluye ensayos de veleta, penetración de cono, compresión edométrica, y compresión triaxial convencional. La caracterización del caolín incluyó además la medición de la curva característica de retención de agua. Los resultados fueron interpretados a la luz de las teorías de ensayos de cono e la teoría de estados críticos para la obtención de parámetros mecánicos de suelo y de la interface cono-caolín. Como producto de los ensayos de laboratorio, fueron propuestas algunas relaciones entre los parámetros de estados críticos y el ensayo de cono. Adicionalmente, con base en los ensayos de laboratorio; el programa NairnMPM fue calibrado para resolver problemas geotécnicos simples como el ensayo de cono y el colapso de una columna de suelo. Finalmente, y con la intención de verificar la capacidad del MPM para resolver problemas de gran escala, se ejecutaron simulaciones numéricas de los deslizamientos en la presa de Vajont en Italia, y en la autopista Tokai-Hokuriku en Japón. El proceso de modelado fue también evaluado por medio de la simulación del deslizamiento de Alto Verde en Colombia. Las derivaciones dinámicas se utilizaron para calcular el riesgo geotécnico. Los resultados se ajustaron muy bien a las observaciones de campo, destacando el potencial del MPM como herramienta numérica para el modelamiento de varios problemas de grandes deformaciones en la ingeniería geotécnica.

El estudio demostró que el método es lo suficientemente robusto para resolver el problema de contacto durante la penetración sin necesidad de utilizar elementos de interface. Sin embargo, el modelo de interacción debe ser mejorado para incluir el efecto cohesivo y friccionante. Finalmente, se resalta que la principal limitación del MPM cuando se compara con el método de los elementos finitos es el mayor tiempo de procesamiento. En el caso de problemas que envuelven grandes deformaciones y dominios extensos; se debe buscar un nivel óptimo entre precisión y tiempo computacional. En el caso de problemas tridimensionales y mallas refinadas el tiempo computacional puede inviabilizar las simulaciones. En estos casos se requiere el uso de procesadores no convencionales con capacidad de paralelización.

Otras aplicaciones de las formulaciones de MPM establecidas, fueron ejecutadas en los diferentes proyectos que se acometieron o realizan en este momento (Anexo VI). Los detalles más relevantes de la formulación se pueden consultar en el Anexo I. Una explicación más detallada se puede conferir en los anexos complementarios.

### **3.0 - Método de Hidrodinámica de partículas suavizada (SPH) en la modelación de problemas de mecánica de sólidos (geomecánica y geotecnia).**

Los métodos numéricos para resolver ecuaciones parciales diferenciales (EPD) tienen particular importancia. Las EPD resultan con gran frecuencia cuando se describen matemáticamente problemas físicos y dinámicos de gran interés para la ciencia y la ingeniería. Un sistema de EPD brinda la



descripción de un problema general, a lo cual se suman condiciones de contorno y condiciones iniciales para describir completamente un problema específico. Muchos esfuerzos se han centrado en resolver esta clase de problemas lo que ha resultado en el desarrollo de varios métodos que permiten encontrar una solución aproximada.

Entre los métodos mejor establecidos que se pueden mencionar están el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de las Diferencias Finitas (MDF) entre otros. Estos métodos, que se conocen como tradicionales, se han venido desarrollando durante mucho tiempo, por lo que ya son muy sofisticados y confiables para varios tipos de problemas entre los que podemos mencionar mecánica de sólidos y geomecánica (considerando pequeñas deformaciones), y dinámica de fluidos.

Los métodos tradicionales se basan en la discretización del medio continuo utilizando mallas. Sin embargo, este esquema de discretización no es adecuado para tratar problemas que han ido ganando creciente atención, como por ejemplo dinámica de fluidos con superficie libre y problemas en los que se consideran grandes deformaciones del dominio de estudio. Debido a estas dificultades, diferentes alternativas se han ido desarrollando con el objetivo de poder simular esta clase de problemas. Una de las alternativas más antiguas y con mayor aplicabilidad hasta la fecha es el SPH (siglas del inglés Smoothed Particle Hydrodynamics).

SPH se describió por primera vez en la década del 70, y fue inicialmente utilizado para realizar simulaciones en astrofísica. Varios estudios extendieron la aplicación del método a otras áreas como la simulación de problemas de mecánica de fluido y para simulaciones de fluidos con superficie libre. En la actualidad el método se ha desarrollado para ser utilizado en un amplio número de aplicaciones, considerando problemas que incluyen fluidos con múltiples fases, fluidos no Newtonianos, micro fluidos, polímeros, lava, medios porosos, explosiones, biomecánica, problemas geotécnicos, etc.

Después de casi cuatro décadas de investigación, el método SPH ha alcanzado la madurez en varios de los temas donde se aplica. Sin embargo, la aplicación del método se sigue expandiendo a áreas donde tiene grandes potencialidades. Una de estas áreas es la geomecánica, donde la aplicación de SPH es relativamente nueva. Uno de los objetivos que se traza este trabajo es la formulación, aplicación y validación de SPH para simular problemas tridimensionales en el área de la geomecánica considerando suelos cohesivos y no cohesivos en grandes deformaciones. Se debe destacar que la aplicación de SPH en este tipo de problemas se ha limitado a suelos no cohesivos, y en el caso de los suelos cohesivos, se ha limitado solo a problemas en dos dimensiones. La formulación que se presenta a propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba en el 2017, efectuó una nueva formulación que elimina las limitaciones anteriores y generaliza el empleo de SPH para resolver los problemas de geomecánica en grandes deformaciones y la solución de problemas acoplados (interacción fluido estructuras y acoplamiento fluido sólido en un mismo dominio).

La principal dificultad de la aplicación de SPH a problemas geotécnicos es que al considerar cohesión en el modelo físico, aparecen inestabilidades numéricas que limitan la aplicabilidad del método. En este trabajo se resuelven estas inestabilidades por medio de la aplicación del método de los estreses artificiales. En esta investigación dicho método había sido aplicado anteriormente para problemas de dos dimensiones y en este trabajo se extiende su aplicación a problemas tridimensionales. Adicionalmente se validan los resultados obtenidos mediante SPH con resultados obtenidos usando MEF. La validación se realiza teniendo en cuenta dos casos de prueba: a) compresión de una muestra de suelo, y b) estabilidad de taludes para dos condiciones de contorno diferentes. Los resultados obtenidos con SPH muestran gran similitud con los obtenidos utilizando MEF. La principal ventaja del uso de SPH se hace visible en las simulaciones de taludes, donde el MEF presenta problemas ante



grandes deformaciones de la superficie de fallo debido a la distorsión de la malla, dificultad que no aparece en SPH.

Otro de los objetivos que se sigue en este trabajo es la aplicación de técnicas para acelerar la ejecución de las simulaciones. Dada la madurez alcanzada por SPH, el método se ha comenzado a aplicar en problemas de la vida real y de gran escala. Al igual que otros métodos basados en partículas, SPH demanda más recursos computacionales que los métodos tradicionales. Una de las causas fundamentales es que para obtener resultados acertados en grandes dominios de cálculo, como los considerados en los problemas reales, es necesario tener en cuenta un gran número de partículas (en el orden de los millones en ocasiones), lo cual resulta en cantidades extremadamente grandes de cálculos a realizar. En esta dirección, este trabajo se plantea el uso de dos técnicas: a) refinamiento dinámico, con el objetivo de disminuir los requerimientos computacionales, y b) paralelización para memoria compartida, para explotar las prestaciones de las computadoras modernas.

La aplicación del refinamiento dinámico se realiza en simulaciones en dos y tres dimensiones. El procedimiento utiliza un criterio de refinamiento para seleccionar las partículas durante la ejecución de la simulación. Una partícula se refina reemplazándola por nuevas partículas “hijas” que se colocan de acuerdo a un patrón con forma de cuadrado o cubo para simulaciones en 2D y 3D respectivamente. En la investigación se estudia el error que introduce el refinamiento, con el objetivo de seleccionar los parámetros óptimos. Además se consideran los posibles efectos que tiene el refinamiento para la estabilidad de las simulaciones y se derivan condiciones de estabilidad. En este sentido se muestra en varios ejemplos como los parámetros del refinamiento deben ser seleccionados de tal manera que el error introducido sea pequeño, y que se disminuyan los riesgos de inestabilidades siguiendo las condiciones de estabilidad.

Para estudiar el refinamiento se seleccionaron problemas que consideraban fluidos con superficie libre (este es un modelo simple y bien establecido en SPH), y además se aplicó el refinamiento al modelo de suelo. Los casos de prueba muestran que la aplicación del refinamiento dinámico produce resultados de buena exactitud y mucha menor demanda computacional.

En el caso de la paralelización para memoria compartida, la estrategia utilizada se centra en acceder eficientemente a los datos en memoria. Para esto se tiene en cuenta la arquitectura de las complejas jerarquías de memorias existentes en las computadoras modernas, específicamente las computadoras con NUMA (Non uniform memory access – acceso no uniforme a memoria). Para esto se utiliza una estrategia basada en la descomposición de dominio combinado con la utilización de Space Filling Curves (SFC - curvas de cubrimiento espacial). La utilización de SFC permite el almacenamiento en memoria de las partículas de forma tal que el movimiento de datos entre los distintos niveles de la jerarquía de memoria se reduce. Adicionalmente permite aplicar un algoritmo simple y eficaz para la descomposición de dominio y el rebalance dinámico de la carga de trabajo entre los procesadores.

Para comprobar la efectividad de la implementación paralela se realizan estudios de escalabilidad tanto débil (weak scaling) como fuerte (strong scaling). También se estudia la eficacia del algoritmo de rebalance de cargas, el cual se comprueba que funciona bien, pero se detectan fuentes para posibles futuras mejoras.

De manera general, en el presente trabajo se contribuye a extender la aplicabilidad del método SPH de dos formas. Primero, validando y extendiendo el método para ser aplicado en el estudio de una nueva clase de problemas para los cuales SPH se muestra como una técnica muy prometedora. Segundo, la implementación del refinamiento dinámico y la paralelización permiten la aplicación del método para resolver problemas de mayor escala de una manera más eficiente. Otra contribución del trabajo es la



implementación de una herramienta de software que incorpora todos los elementos estudiados en la investigación. Esta herramienta usa un diseño genérico, en el cual se explotan técnicas de meta-programación, con el objetivo de lograr una librería flexible para la implementación de diferentes modelos de SPH.

Otro de los aportes realizados en esta investigación es la formulación del método SPH en la solución de problemas de erosión de suelos. En este trabajo se presenta un enfoque multidisciplinario, que combina modelos constitutivos de fluidos con conceptos de hidráulica de canales abiertos y criterios de ruptura propios de la geomecánica para simular problemas de erosión superficial usando o método numérico *Smoothed Particle Hydrodynamics* - SPH.

Por su naturaleza Lagangeana, el método SPH constituye una herramienta ideal para abordar problemas multifásicos, que incluyan superficies libres y grandes desplazamientos relativos de material como es el caso de erosión de suelos. El enfoque propuesto en este trabajo, el agua y los sedimentos son tratados como fluidos Newtonianos y no Newtonianos, respectivamente. Un criterio hidráulico, fundamentado en el parámetro de Shields, se utiliza para determinar el inicio del movimiento de las partículas producido por la acción del agua en un lecho de sedimentos (suelo). El criterio logra estimar de forma satisfactoria la masa de material erosionado bajo condiciones de flujo de baja velocidad, pero no permite simular la dinámica de los sedimentos en regiones subsuperficiales. El criterio hidráulico fue combinado con un criterio mecánico, basado en el criterio de ruptura de Drucker-Prager, para determinar la viscosidad aparente de los sedimentos, cuya dinámica se simula utilizando un modelo visco plástico tipo Bingham, denominado Herschel-Bulkley-Papanastasiou (BHP). El modelo permite simular comportamientos pseudo-plásticos e dilatantes del material.

La implementación computacional fue realizada en un código escrito en C++ CUDA, que calcula en la tarjeta de video, lo que genera un considerable disminución en el tiempo de cálculo, siendo posible simular dominios mayores en mucho menor tiempo.

El modelo propuesto fue aplicado para la simulación de ensayos a escala de laboratorio. La primera aplicación fue un problema de lavado de material en un tanque de sedimento, que simula el proceso de limpieza de sedimentos por descarga de fondo en presas donde existe acumulación de material aguas arriba de la estructura de contención de agua. El segundo caso fue un canal hidráulico, que simula erosión en ambientes fluviales. El tercero y cuarto caso fueron simulaciones de ruptura de columnas de agua (*dam break*) sobre un lecho de sedimentos, que simula el efecto del impacto del agua en las regiones subsuperficiales del lecho de sedimentos.

A pesar de la disminución del tiempo de cálculo dada por la implementación en CUDA, todavía no es posible realizar simulaciones de casos en escala real. Sin embargo, los ensayos de laboratorio simulados, muestran indicios de que el modelo es aplicable una serie de problemas de ingeniería. Entre ellos pueden mencionarse:

- *Problemas de transporte y deposición de sedimentos en ambientes fluviales:* Este tipo de problemas provoca disminución del calado y la interrupción de la navegación en canales y ríos navegables.
- *Problemas de deposición de material en el fondo de presas:* Este fenómeno disminuye la capacidad de almacenamiento de agua en las presas y está estrechamente relacionado a las tasas de transporte de material en el lecho de los ríos que alimentan la presa.





- *Problemas de erosión localizada aguas abajo de los aliviaderos de presas:* Este tipo de problemas genera socavación en las estructuras civiles de los aliviaderos y en casos extremos puede llevar al colapso del mismo.
- *Problemas de erosión localizada en estructuras portuarias:* En puertos de poco calado, o con material muy fino en el fondo, las propelas de los barcos generan erosión en la proximidad de los muelles y en casos extremos puede llevar a la falla de la estructura por exposición de la cimentación.

Otras aplicaciones de las formulaciones del método SPH establecidas en este trabajo, fueron ejecutadas en los diferentes proyectos que se realizaron o se ejecutan en este momento (Anexo VI). Los detalles más relevantes de las formulaciones se pueden encontrar en el Anexo II. Una explicación más detallada se puede consultar en los anexos complementarios.

#### 4.0 – Métodos de los Elementos Discretos

En la literatura existe una gran cantidad de formulaciones del MED, las cuales son tratadas de una u otra forma, pero existiendo un enfoque específico (tipo de partícula, modelos constitutivos, esquema de integración, técnicas de búsqueda de vecindad y contacto), para cada componente de la formulación. Las mismas de modo global se caracterizan por las técnicas que son complemento de dichas formulaciones. En este sentido se identifican los elementos más distintivos:

- Tipo de partícula para el que está formulado el método.
- Esquema de integración para resolver las ecuaciones de movimiento de Newton-Euler.
- Estabilidad del método y estimación del paso de tiempo de integración
- Modelo constitutivo o modelo de contacto y estimación de parámetros constitutivos de contacto.
- Búsqueda de vecindad y contacto o consulta espacial.
- Técnica de paralelismo y manejo masivo de información.

Desde el punto de vista matemático, computacional y físico, las formulaciones del MED están en fase de investigación para contribuir a su desarrollo. En este sentido los aspectos más significativos son:

##### *Aspectos matemáticos*

1. Método de solución de la ecuación diferencial.
2. Estabilidad de método de solución y paso de integración

##### *Aspectos Computacionales*

1. Consulta espacial: Método de búsqueda de contacto global para el sistema de partículas.
2. Paralelización de la implementación computacional.

##### *Aspectos Físicos*

1. Escala de modelación de los problemas físicos
2. Resolución de problemas acoplados y multifísica
3. Modelos constitutivos de contacto.
4. Estimación de parámetros constitutivos de contacto.
5. Estudio paramétrico de la influencia de los elementos y factores de la formulación.

Estos aspectos implican definir en esta investigación los elementos que serán abordados para aportar al desarrollo de la formulación del MED con la finalidad de establecer la técnica más adecuada en función del problema físico que se trate y logrando establecer una formulación genérica con arquitectura abierta.

- Formulación genérica del MED para cualquier tipo de partículas.
- Formulación acoplada del MED para abordar problemas de multifísica.



- Empleo de diversas técnicas de esquemas de integración, con la posibilidad de resolver las ecuaciones diferenciales por una u otra.
- Arquitectura abierta para el empleo de diversas tecnologías de consulta espacial y búsqueda de contacto entre partículas.
- Arquitectura abierta para la formulación y empleo de diversos modelos constitutivos.

Tomando como base los aspectos anteriormente mencionados en este trabajo se efectúa una formulación genérica del método de los elementos discretos para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional. El mismo está formulado para cualquier tipo de partícula incluido partículas irregulares (reales). La resolución de las ecuaciones de gobierno están formuladas para ser resueltas por varias técnicas de integración y empleando diferentes tecnologías de consulta especial incluidas algunas que son formulaciones establecidas por los autores de este trabajo. En el mismo se desarrollan y formulan varios modelos constitutivos para describir diversos tipos materiales.

En la implementación computacional propuesta del MED las clases computacionales se dividen en dos grandes familias: aquellas que representan datos y las que representan funcionalidad. Esto se hace con el objetivo de buscar flexibilidad a la hora de reemplazar piezas de funcionalidad, siendo la clase [Simulation](#) la que reúne todos los componentes del sistema y representa una simulación en su totalidad. Los principales componentes de datos en la simulación son los objetos de la clase [Particle](#). Entre dos partículas puede existir una interacción ([Interaction](#)), la cual genera fuerzas. Estos tres componentes son almacenados dentro de la clase [Simulation](#) en contenedores especiales. A continuación se describen estos elementos principales.

Los objetos de la clase [Particle](#) contienen su forma como una instancia de la clase [Shape](#), la cual representa la forma de la partícula de manera independiente a su orientación espacial. Ejemplos de formas ([Shape](#)) pueden ser esferas ([Sphere](#)), caras o triángulos ([Face](#)), y planos ([Plane](#)). Adicionalmente, la partícula contiene información de su estado incluyendo posición, rotación, si es móvil o no, masa, momento de inercia, velocidad, aceleración, etc. También, a través de la característica [Shape](#), se puede calcular una caja acotadora alineada con los ejes ([AABB](#)) o una esfera circunscrita, la cual se usa en la búsqueda global de vecindad, como se verá más adelante.

La clase [Interaction](#) representa una interacción entre dos partículas y contiene los identificadores de las partículas en interacción. Estos identificadores coinciden con el índice en la colección donde se almacenan las partículas. La geometría del contacto es una instancia que hereda de la clase [ContactGeometry](#), la cual representa características específicas de la interacción y varía según sean las formas de las partículas en interacción y la ley constitutiva que se esté usando. En caso de ser nula la descripción del contacto, se trata de una interacción potencial detectada durante la búsqueda global de vecindad, la cual aún no se tiene la seguridad que será tomada en cuenta por la ley constitutiva que se esté usando.

Las fuerzas, al contrario de lo que se podría esperar, no son almacenadas en la misma partícula, sino en una colección especial dentro de la clase [Simulation](#). Esto se hace con el objetivo de optimizar el cálculo de las fuerzas usando múltiples hilos de ejecución, para lo cual se crea un arreglo de fuerzas independiente para cada hilo (lo que evita tener que hacer sincronización) y luego se calculan las fuerzas resultantes sumándolas.

Los componentes de funcionalidad entran en acción a la hora de ejecutar el ciclo principal de la simulación que se inicia con la llamada del método [Simulation::Run\(\)](#) y de forma general realizan las funciones del Figura 3: Diagrama.



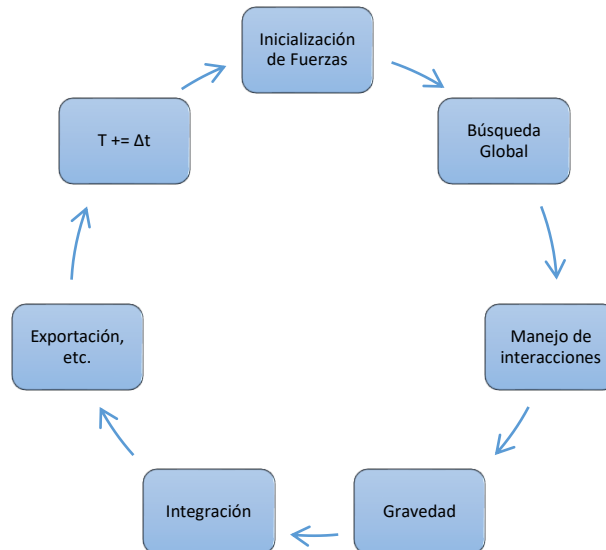


Figura 3: Diagrama: Ciclo principal del MED.

Todos estos pasos del diagrama anterior se implementan como instancias de clases que heredan de **Engine** o de **GeneralPurposeEngine**, que actúan como base para todos los componentes de funcionalidad. La herencia de estas dos clases se caracteriza de la siguiente forma:

- **Engine**: Las clases que hereden de **Engine** deben implementar un solo método **Execute** que toma como parámetro un puntero a la simulación.
- **GeneralPurposeEngine**: Las clases que hereden de **GeneralPurposeEngine** pueden elegir implementar varios métodos que se llamarán en distintas partes del ciclo de simulación. Algunos de estos son **BeforeStep**, **AfterInteractions** y **AfterStep**, caracterizados de la siguiente forma:
  - **BeforeStep**: Se llama antes de iniciar cada paso de simulación.
  - **AfterInteractions**: Se llama después que se manejan las interacciones y se calculan las fuerzas.
  - **AfterStep**: Se llama después de terminar cada paso de simulación.

Después de haber establecido una formulación sistémica, genérica del método de los elementos discretos enfocado al estudio de diferentes escalas, se ha llegado a una serie de resultados significativos en el campo de la modelación con este método de partículas:

- Se establece una formulación del método de los elementos discretos que posibilita abordar diversos problemas de ingeniería, donde estén presentes disímiles geometrías de partículas debido a que la formulación presenta un carácter genérico en este sentido.
- Se establece una formulación termo-mecánica acoplada que permite enfrentar problemas de ingeniería muy complejos con presencia de multifísica como los de desgaste teniendo en cuenta el efecto mecánico, térmico y los cambios de las propiedades de los materiales causados por este último aspecto.
- Se establece un enfoque integral y sistémico que posibilita disponer de una formulación abierta en cuanto a empleo de diversos esquemas de integración, algoritmos de búsqueda de consulta espacial para la delimitación de vecindad y contacto y el empleo de diversos modelos constitutivos.
- Se formula teóricamente el Método de Elementos Discretos de una forma que permite el uso de cualquier esquema explícito de integración numérica.



- Desde el punto de vista computacional se crea una formulación del MED con arquitectura abierta en cuanto al empleo de diversas técnicas de consulta espacial para la determinación de vecindad y contacto, dejando sustentadas las bases para los estudios de eficiencia computacional de estas alternativas, tomando en consideración que este aspecto es el más costoso computacionalmente en la formulación.
- Con el establecimiento de la formulación genérica, sistémica e integradora se sientan las bases para la paralelización del MED con una arquitectura abierta, aspecto que mejora la problemática de costo computacional de esta formulación.
- Desde el punto de vista de modelación constitutiva se establece una formulación abierta que permite el empleo de diversos modelos constitutivos que describen el comportamiento de diferentes materiales. Se han detallado el modelo de contacto elastoplástico cohesivo con falla frágil a nivel de contacto, el modelo de contacto elastoplástico friccional y el modelo de contacto elastoplástico friccional que incluye desgaste y generación de calor. Se ha incluido también la formulación de resistencia al rodamiento, la cual no aparece en todas las formulaciones del MED existentes en la literatura, pero que resulta importante porque hace que la simulación sea más realista.
- Se establecen las bases del diseño computacional del MED con un enfoque genérico, sistémico e integrador para el estudio de problemas de multifísica al nivel de la multiescala. Se dispone de un prototipo inicial que cumple con los preceptos mencionados, para realizar las simulaciones con DEM.

Colateralmente a la formulación genérica del DEM formulada en UCLV, el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE) de conjunto con investigadores cubanos (UCLV) efectuaron una formulación multi-física del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas acoplados: termo-mecánico acoplados incluido simulación de problemas de desgastes.

Posteriormente a estas investigaciones desarrolladas en Cuba y de modo conjunto entre CIMNE y UCLV, los investigadores de CIMNE efectuaron 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). En este centro europeo se ha desarrollado el método PFEM y esto propicio el acoplamiento entre DEM/FEM y DEM/PFEM. En estos casos se empleó la formulación genérica del DEM desarrollada en UCLV.

Paralelamente a las investigaciones realizadas tanto en CIMNE como UCLV de modo combinado se efectuaron investigaciones dirigidas a efectuar estudios de interrelación entre propiedades constitutivas de contacto y las propiedades constitutivas convencionales. Este estudio se realizó para los diferentes modelos constitutivos de contacto formulados.

Una explicación detallada de las formulaciones realizadas en el caso de DEM se puede encontrar en el Anexo III y en los anexos complementarios. Las aplicaciones del DEM realizadas en este trabajo, fueron ejecutadas en los diferentes proyectos que se realizaron o se ejecutan en este momento (Anexo VI). Los detalles más relevantes de las formulaciones se pueden encontrar en el Anexo II. Una explicación más detallada se puede consultar en los anexos complementarios.

## 5.0 - Aplicaciones en Proyectos de investigación

Como parte del proceso de investigación y sobre todo de aplicación de las formulaciones desarrolladas (MPM, SPH y DEM) en esta propuesta de premio a la Academia de Ciencias de Cuba, se han ejecutado y se continúan trabajando en varios proyectos de investigación nacionales e internacionales. Los resultados principales son:



- Contribuciones al desarrollo de las formulaciones teóricas de SPH, DEM y MPM,
- Aplicaciones de estas formulaciones a la resolución de diversos problemas de ingeniería.

Un resumen de los proyectos que forman parte de la propuesta de premio son:

- Proyectos Cooperación Internacional; UCLV- CIMNE en ejecución : 4
- Proyectos Nacionales en ejecución : 4
- Proyectos Internacionales culminados: 9
- Proyectos Internacionales en ejecución: 7 (UCLV – CUJAE - UNICA – UnB: 6 y UCLV- K. U. Leuven – 1)
- Proyectos Internacionales donde participan investigadores de UCLV y CUJAE: 9 (CIMNE - UCLV -7, 2 – UnB – UCLV, CUAJE).

Dentro de los proyectos de cooperación científica entre UCLV y CIMNE se encuentran: 1 - GenPaking-Particle, 2 - Sim-DEM, 3 - Visual Particle, 4 - Parallel Particles. Estos son proyectos de investigación básica que se centran en el desarrollo del método de los elementos discretos. Para una mayor información se puede consultar el Anexo VI. Actualmente estos proyectos son el sustento de la cooperación entre CIMNE y UCLV y los resultados de las investigaciones básicas desarrolladas en UCLV se han empleado en otros proyectos nacionales e internacionales para resolver diversos problemas de ingeniería.

Existen una serie de proyectos nacionales que se ejecutan actualmente donde se aplican los resultados de las investigaciones básicas relacionadas con el desarrollo de los métodos MPM, SPH y DEM. Dentro de estos proyectos se encuentran: 1 - Proyecto Tarea Triunfo – Balística de Efecto y Blindaje, 2 - Micro-modelación (No. 9169) – Proyecto de modelación micro de materiales, 3 – Penetración de Cloruros (No. 9178) – Modelación de la penetración de cloruros en hormigones a escala micro (No. 9178), 4 – TenoAvanFerro – Proyectos de desarrollo del sector ferroviario (No. 9708). Una explicación general de los mismos se puede localizar en el Anexo VI.

Como el trabajo científico realizado tiene más de 10 años en ejecución, se han enfrentado varios proyectos internacionales que ya han culminado con diversas aplicaciones. Dentro de estos proyectos se encuentran: 1 - Proyecto CUTTER - *Enhanced design and production of wear resistant rock cutting tools for construction machinery* (Ref. G1RD-CT-2000-00-00161. Program GROWTH), 2 - Proyecto PARAMIX I: *Road pavement rehabilitation techniques using enhanced asphalt mixtures*. (Ref. GRD1-2000-25168. Program GROWTH), 3 - Proyecto PARAMIX II: *Road pavement rehabilitation techniques using enhanced asphalt mixtures*, (Ref. GRD1-2003-25169. Programa GROWTH), 4 - TUNCONSTRUCT: *Technology innovation in underground construction*, (Ref NMP2-CT-2005-011817. FP6-NMP), 5 - Proyecto Ciudad Multidimensional, PROFIT, 5 - Proyecto VLIR – Iniciativa Propia – Desarrollo de Técnicas Computacionales de Avanzada, 6 - XLIDE, Desarrollo de Herramientas para el Análisis de Estabilidad en Laderas con Riesgo Potencial sobre Infraestructuras (Referencia: IPT-2011-1287-370000), 7 - ACUÑA, Desarrollo de un prototipo de bloque en forma de cuña y de la metodología para su uso como protección frente a la erosión en presas o balsas de materiales sueltos (PLAN NAC. I+D), 8 - SAFECON. *New Computational Methods for Predicting the security of constructions to Water Hazards accounting for fluid-soil-structure interactions* (Referencia: 267521). Una explicación general del contenido de estos proyectos y sus áreas de aplicación se encuentran en el Anexo VI. En el mismo (Anexo VI) se reflejan cuál de los métodos numéricos (MPM, SPH y DEM) que forman parte de esta propuesta de premio ha sido aplicado para el estudio de los aspectos abordados en estos proyectos.



En la actualidad están funcionando otros proyectos de carácter internacional que son la base de las aplicaciones de los desarrollos teóricos de avanzada de modelación numérica (FEM, PFEM, DEM SPH, MPM) que se presentan a propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba. Dentro de estos proyectos en ejecución se encuentran: 1 - Proyecto VLIR – RIP – VIBRAS – (Bélgica), 2 - Proyectos CAPES/MES: Desarrollo de tecnologías de avanzada de modelación con partículas (DEM). (Brasil), 3 - Proyectos CNPq: Desarrollo de técnicas de modelación numérica de problemas complejos de ingeniería del petróleo (Brasil), 4 - Proyecto CNPq: Desarrollo de técnicas de simulación numérica para aerogeneradores. (Brasil), 5 - Proyecto CAPES/MES: Modelación y diseño de terraplenes y pavimentos, empleando técnicas de simulación numérica (Brasil), 6 - Proyecto CAPES/MES: Desarrollo conceptual e implementación de un sistema de gestión de riesgos por deslizamientos de taludes y laderas ocasionados por lluvias basado en tecnologías de avanzada (Brasil), 7 - Proyecto CAPES/MES: Comportamiento resistente y deformacional de pilotes bajo el efecto de carga lateral (Brasil). En estos proyectos se aplican los diferentes métodos numéricos (MPM, SPH y DEM) en la resolución de diferentes problemas de ingeniería. Estas aplicaciones van desde el estudio dinámico de estructuras, problemas de ingeniería del petróleo, aerogeneración (interacción fluido estructura), vías de comunicación, cimentaciones profundas, deslizamiento de taludes y laderas entre otros. Una explicación general de estos proyectos se puede consultar en el Anexo VI.

Como parte de la colaboración entre la UCLV, CIMNE y UnB (UCLV- CIMNE o UCLV-UnB) se participa en un grupo de proyectos europeos donde las tecnologías desarrolladas (MPM, SPH y DEM), son empleadas en el abordaje de diferentes problemas de ingeniería. En estos casos la UCLV participa con personal investigador en los proyectos siguientes: 1 - MONICAB: Desarrollo de herramientas para la modelación numérica (DEM) del efecto de la contaminación del balasto con arena en líneas de alta velocidad (Reference: BIA2015-67263-R), 2 - ICEBREAKER: *Development of new computational methods (DEM, SPH y MPM) based on particles for ice-ship interaction problems* (Reference: 737424), 3 - NICE-SHIP: *Development of new Lagrangian computational methods for ice-ship interaction problems* (Reference: GRANT12118656 - SA16N002), 4 - SimPhoNy: *Simulation framework for multi-scale phenomena in micro and nanosystems* (Reference: 604005), 5 - VOLADAPT: "Nuevo proceso de voladura mediante técnicas predictivas y adaptativas, eficaz y eficiente en la utilización de recursos y materias primas, minimizando las emisiones (Reference: RTC-2014-2237-5), 6 - PARTING: Métodos de Partículas (SPH, DEM y MPM) en Geomecánica (Reference: BIA2013-48133-R), 7 - BALAMED: Modelación numérica del conjunto carril-travesa-balasto mediante el Método de los Elementos Discretos (Reference: BIA2012-39172), 8- SPH-Erosion: Numerical simulation of soil erosion using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (Ref. 04036742), 9 - Geo-Excel Project. "Numerical Simulations of Geotechnical Problems using MPM. Una explicación general de estos proyectos y los problemas que se resuelven con la aplicación de los métodos MPM, SPH y DEM se puede conferir en el Anexo VI.

## 6.0 – Ejemplificación de las aplicaciones de los métodos MPM, SPH y DEM.

Todas las aplicaciones del presente trabajo se encuentran relacionados con los diferentes proyectos de investigación nacionales e internacionales, que se han efectuado (Anexo VI). Como es conocido todos los métodos que forman parte de la propuesta de premio son formulaciones numéricas muy reciente y están en fase de desarrollo e implementación para consolidarse y posteriormente aplicarse en la resolución de problemas reales de ingeniería. En casos puntuales si se efectúan estudios de simulación efectivos y viables comparados con otros métodos numéricos más consolidados. Como herramienta de validación se contrastan los resultados obtenidos con los diferentes métodos (MPM, SPH y DEM) con resultados experimentales reales (a escala real y laboratorio) y con los resultados de otros métodos.

## 6.1 – Ejemplificación de aplicaciones del método MPM.

Los principales aporte al método MPM se efectúan en el desarrollo de formulaciones para resolver problemas de geomecánica en grande deformaciones. Las aplicaciones de estas formulaciones se efectuaron en proyecto Geo-Excel Project. (Anexo VI). En este sentido se resuelven problemas geotécnicos como ensayos de penetración (*en campo*: SPT, CPT, DMT; *en laboratorios*: ensayo de penetración de cono y el ensayo de veleta) y además Inca de pilotes, Deslizamientos de Taludes, etc. Esta formulación se acopla con otros métodos para disminuir el costo computacional. Como es de esperar para enfrentar problemas de mecánica de suelos es necesario formular el método de MPM con el empleo de modelos constitutivos de geomateriales. En este caso se formularon varios modelos constitutivos de geomateriales para modelar rocas y suelos. Las primeras simulaciones con MPM se realizaron a casos simples como ensayos a escala (Figura 3 y 4) y se contrastaron los resultados con ensayos de laboratorios reales.

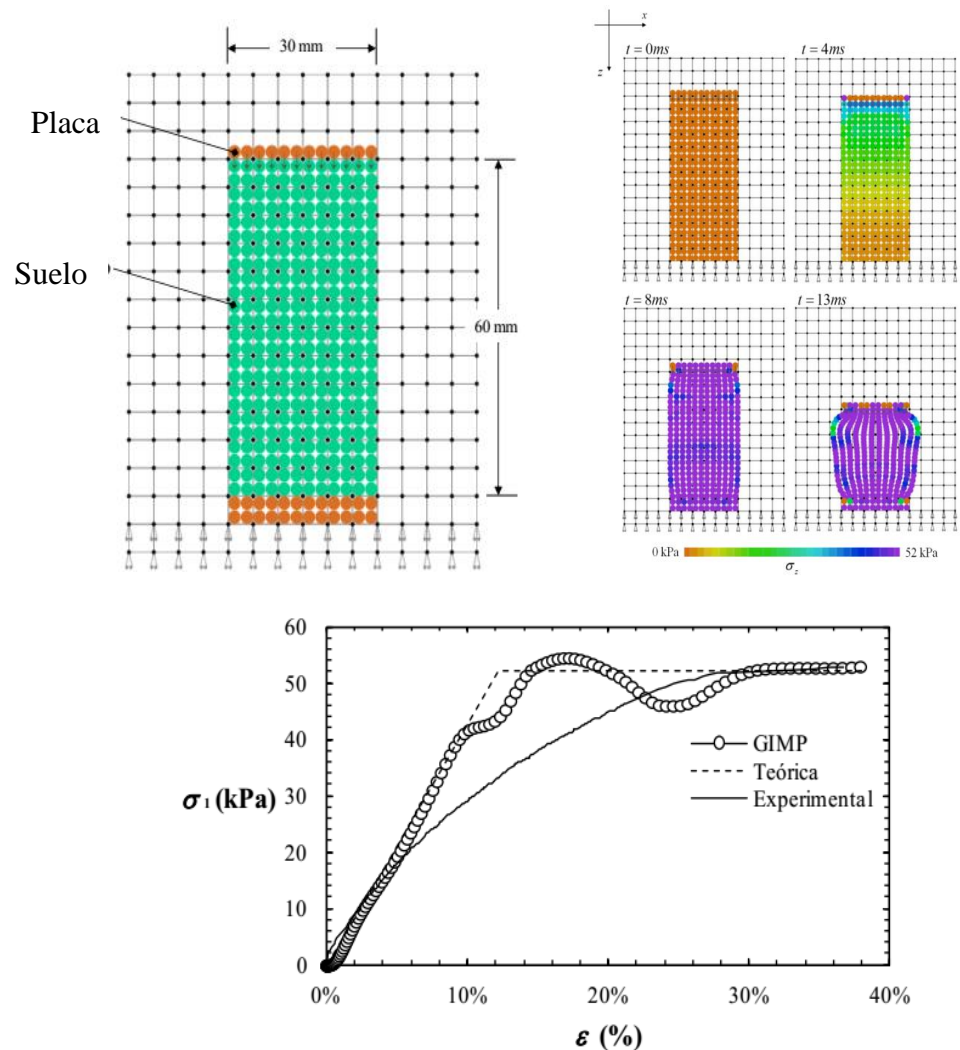


Figura 3: Modelación de ensayos de laboratorio a escala con el método MPM. Ensayo de compresión no confinada empleando un modelo constitutivo no adecuado completamente para suelos.



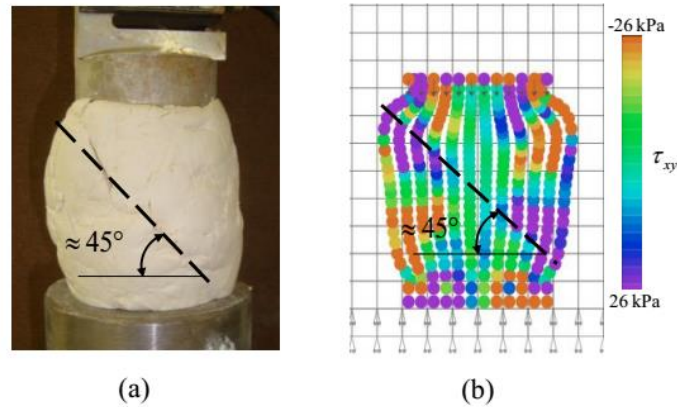


Figura 4: Contraste entre la experimentación y la modelación numérica de un ensayo de compresión no confinada de suelos con el método MPM, empleando un modelo constitutivo coherente con el comportamiento del suelo y readecuado para esta formulación numérica.

Colateralmente se efectuaron simulaciones numéricas de problemas del estado tensional de la masa de suelo ante cargas uniformemente distribuidas con el método MPM y se compararon con soluciones analíticas y numéricas (Figura 5). Dentro de los ensayos de laboratorio se simulaban los ensayos de penetración de cono (Figura 6 y 7) y se contrastaron los resultados con ensayos experimentales en diferentes tipos de suelos. Se efectuaron simulaciones numéricas a escala de laboratorio (Figura 7) y se contrastaron con ensayos reales existentes en la literatura.

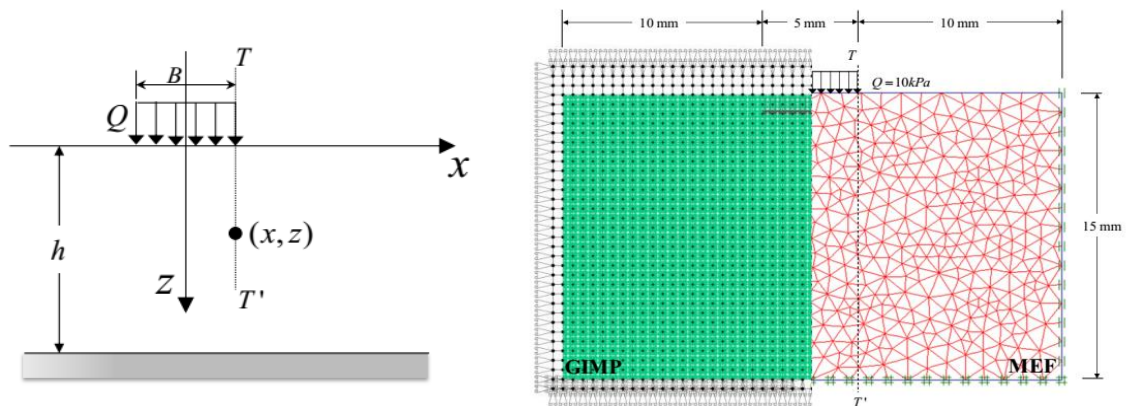


Figura 5: Modelación de un problema geotécnico en estado deformacional plano con MPM y FEM.

Primeramente se efectuaron modelaciones en 2D a escala de laboratorio de deslizamiento de taludes y se compararon los resultados con ensayos efectuados a esta misma escala (Figura 8). Estudios clásicos de falla de columnas de suelos a escala de laboratorio también fueron simuladas (Figura 9) con el método MPM. El acoplamiento entre MPM / FEM fue una alternativa para modelar el ensayo de cono (Figura 10) estudiado previamente con MPM (Figura 6 y 7) donde se contrastaron los resultados con estudios experimentales efectuados en algunas tesis de maestría y doctorado que forman parte de esta propuesta de premio.

Como parte de la investigación se modelaron otros problemas de deslizamiento de taludes y laderas (Figura 11) y se compararon los resultados con el método de los elementos finitos (FEM). Se efectuó

además la simulación de la capacidad de carga de un cimiento y se compraron los resultados con los las soluciones analíticas (12), reportándose excelentes resultados.

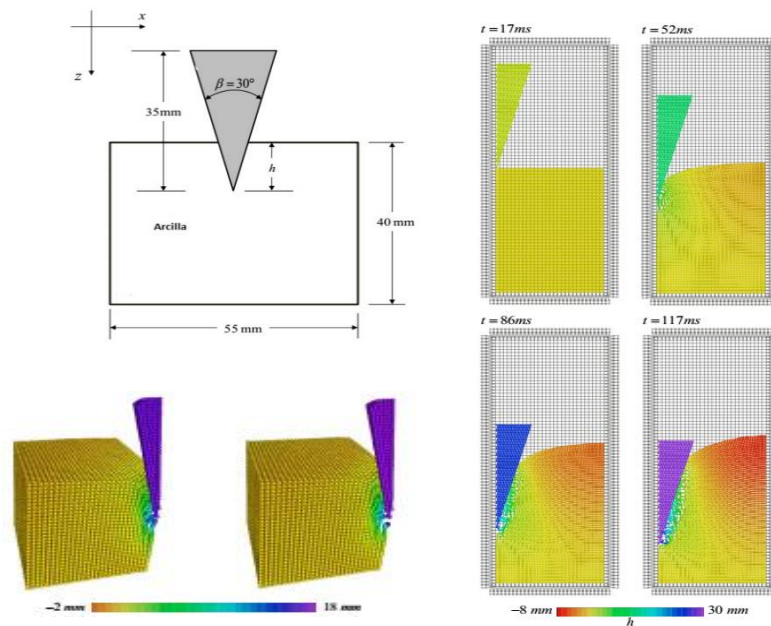


Figura 6: Modelación del ensayo de cono 2D y 3D con MPM.

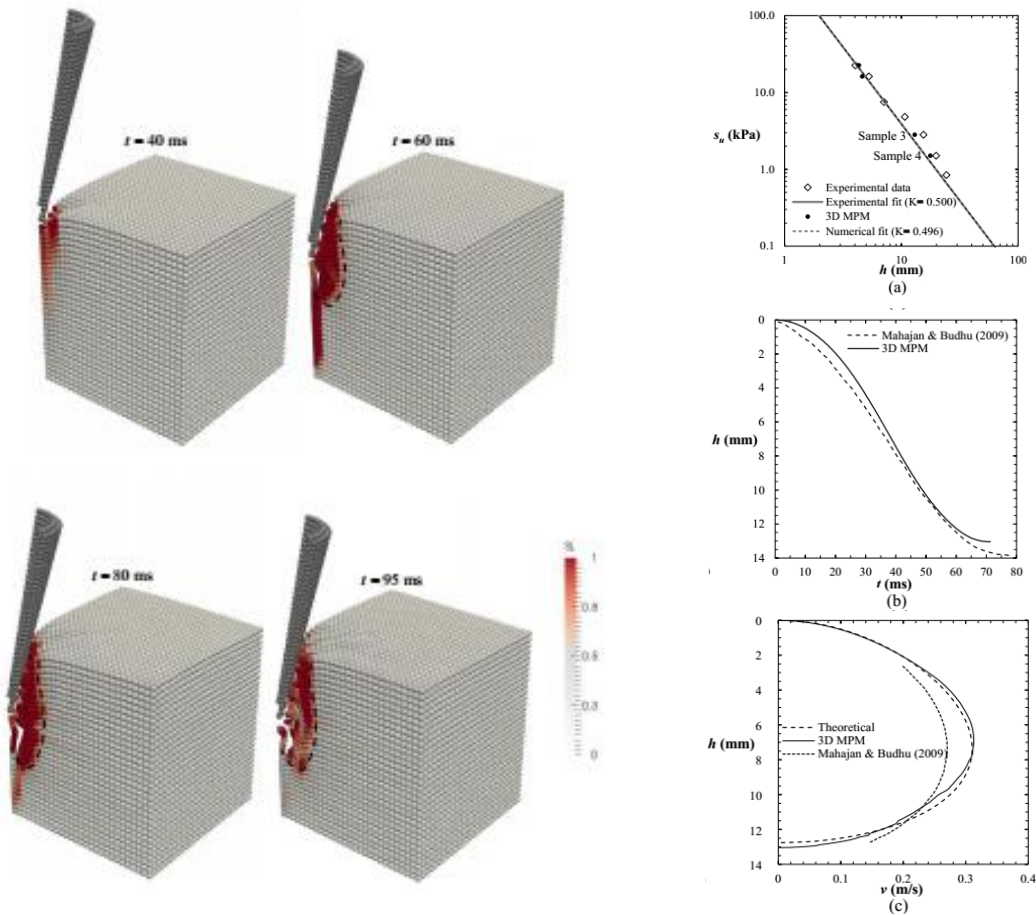


Figura 7: Modelación del ensayo de cono 2D y 3D con MPM. Comparación entre resultados experimentales y numéricos.



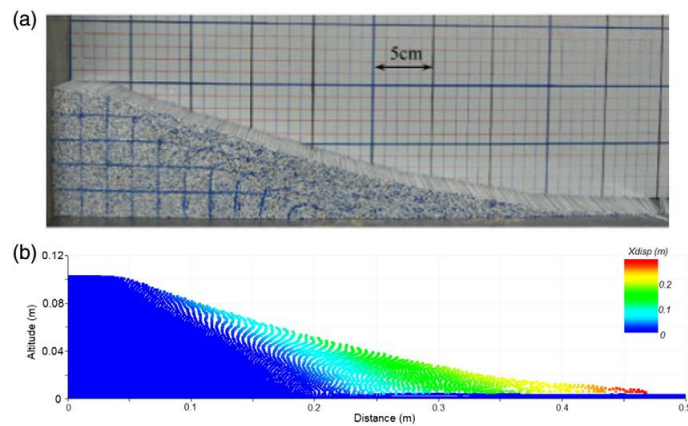


Figura 8: Modelación de un deslizamiento de tierra a escala de laboratorio con MPM

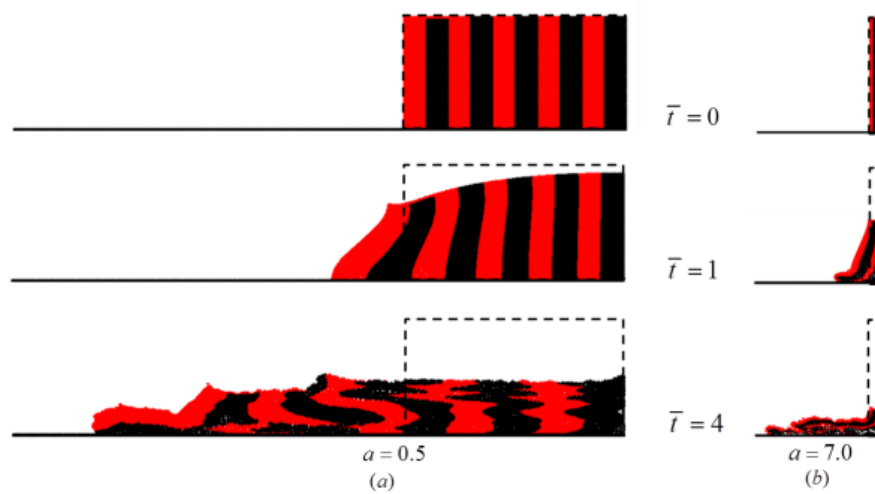


Figura 9: Modelación con MPM del colapso de una columna de suelo.

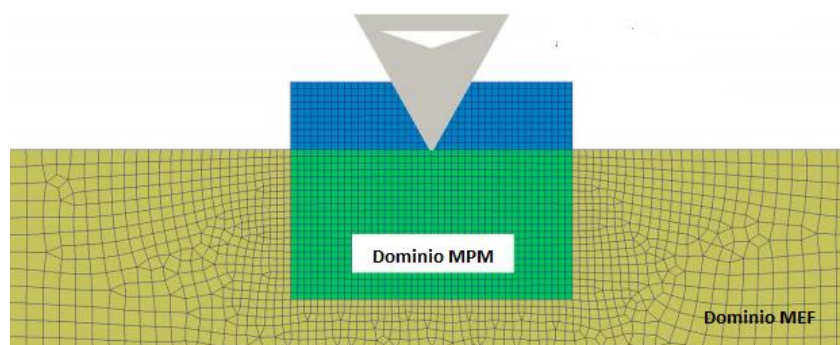


Figura 10: Acoplamiento entre MPM y MEF. Modelación de penetración de un cuerpo rígido.

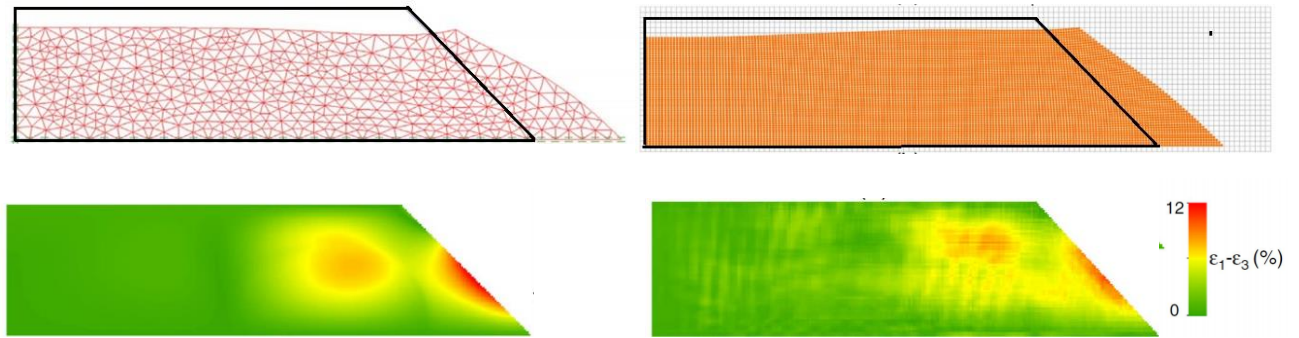


Figura 11: Modelación teórica de un problema de deslizamiento de taludes en 2D con MEF y MPM.

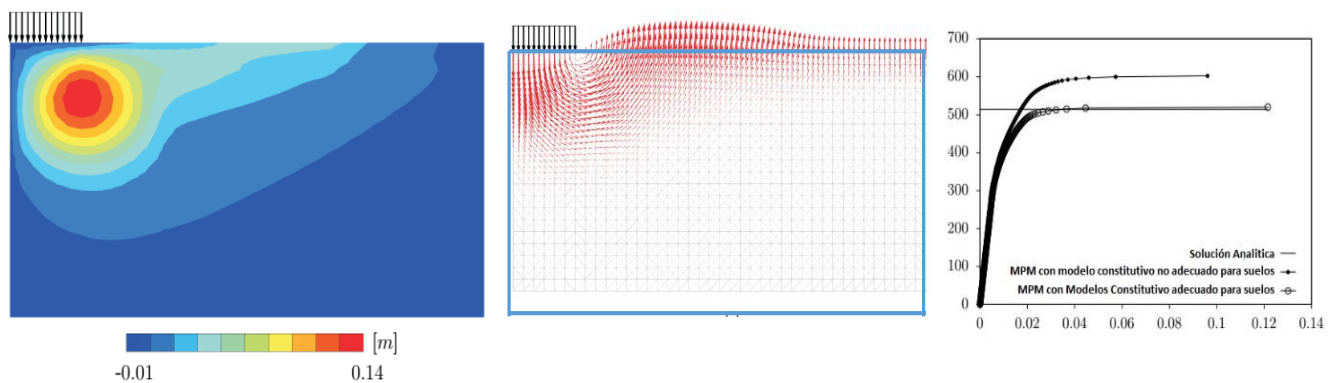


Figura 12: Modelación de capacidad de carga en suelos con MPM

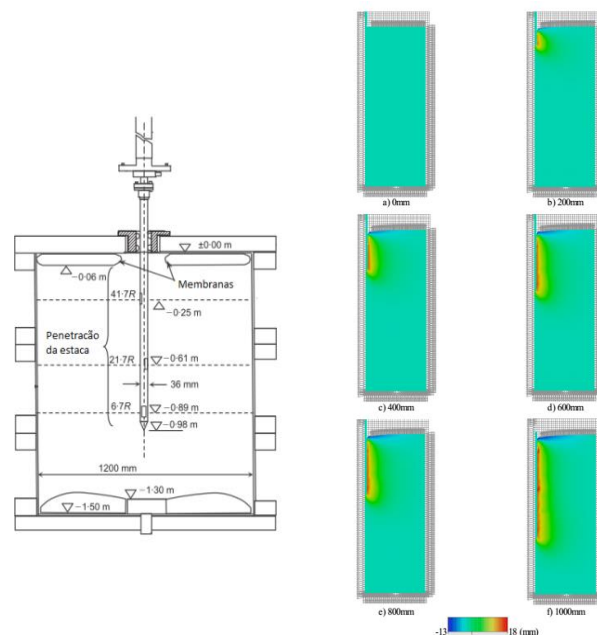


Figura 13: Modelación real de un ensayo de penetración en una cámara experimental en arena

Los ensayos de penetración a escala fueron abordados (Figura 13) en una cámara de arena y se efectuaron las simulaciones numéricas con el método MPM comparando ambos resultados. Este estudio permitió una validación de la formulación realizada. Posteriormente se efectuaron

simulaciones reales de inca de pilotes (Figura 14) y de modelación de obras subterráneas empleando el acoplamiento entre MPM/FEM para disminuir el costo computacional de las simulaciones.

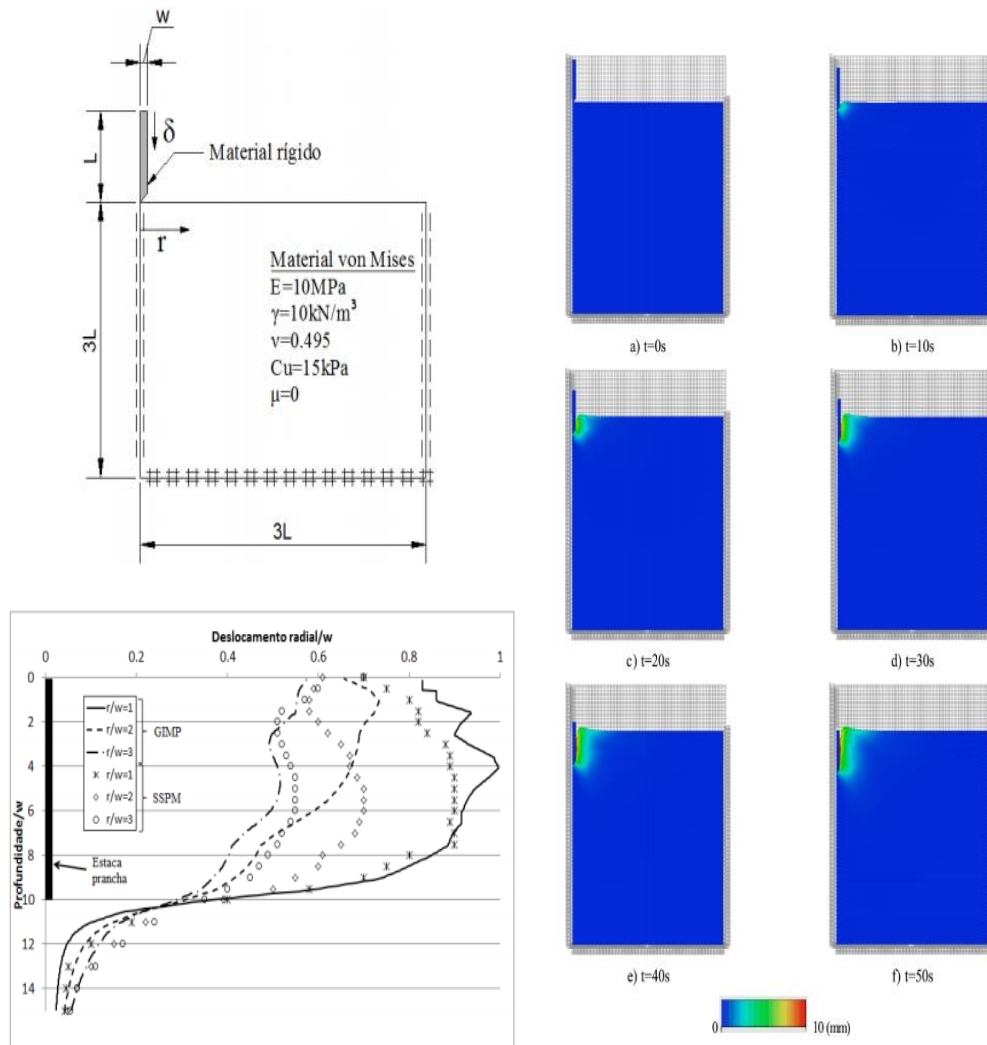


Figura 14: Modelación real de un proceso de inca de pilotes con el método de MPM.

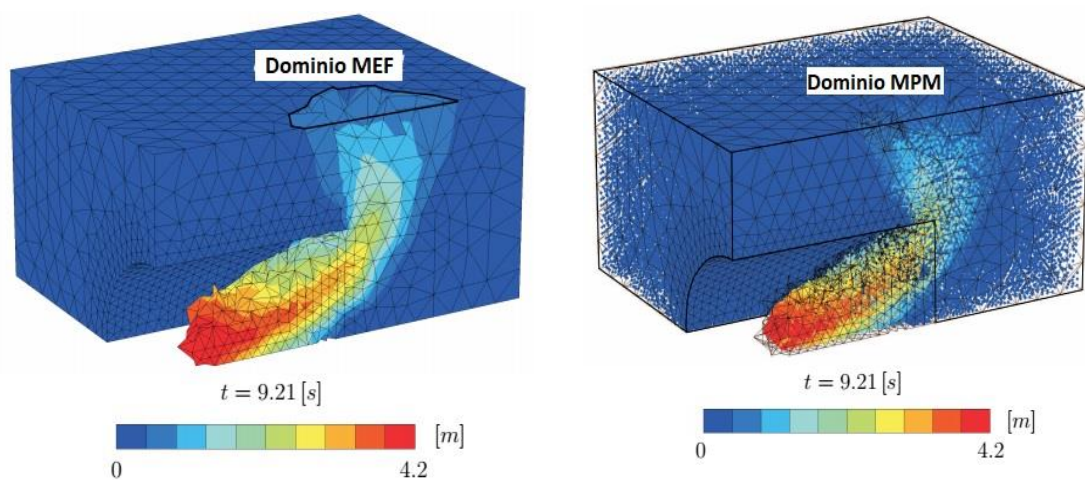


Figura 15: Modelación de obras subterráneas con MPM/FEM



Estudios reales de deslizamiento de taludes y laderas a nivel de macro-escala fueron enfrentados como parte de las investigaciones realizadas. En este caso se procedió a efectuar la modelación de casos reales reportados en la literatura como: Deslizamiento de la Autopista Tokai-Hokuriku (Figura 16) 2- Deslizamiento Alto Verde (Figura 17) y 3 - Deslizamiento Vajont (Figura 18). Estos estudio valido el empleo del método MPM para la modelación de casos reales donde estén presente grandes deformaciones.

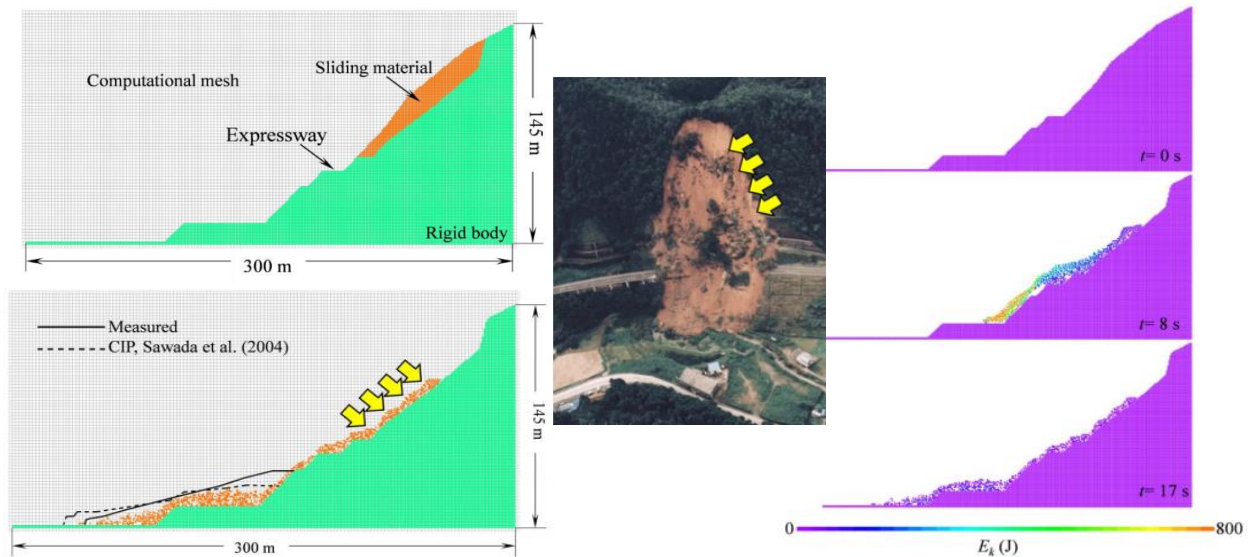


Figura 16: Modelación real de deslizamiento de un talud (Deslizamiento de la Autopista Tokai-Hokuriku) en 2D con MPM.

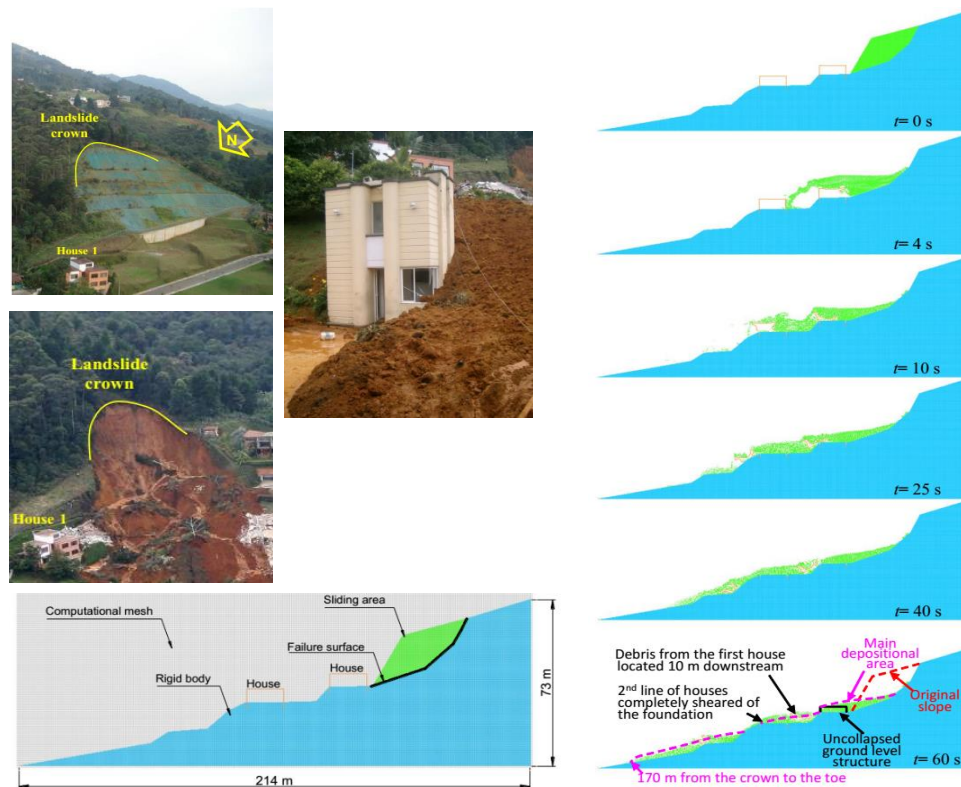


Figura 17: Modelación real de deslizamiento de un talud (Deslizamiento Alto Verde) en 2D con MPM

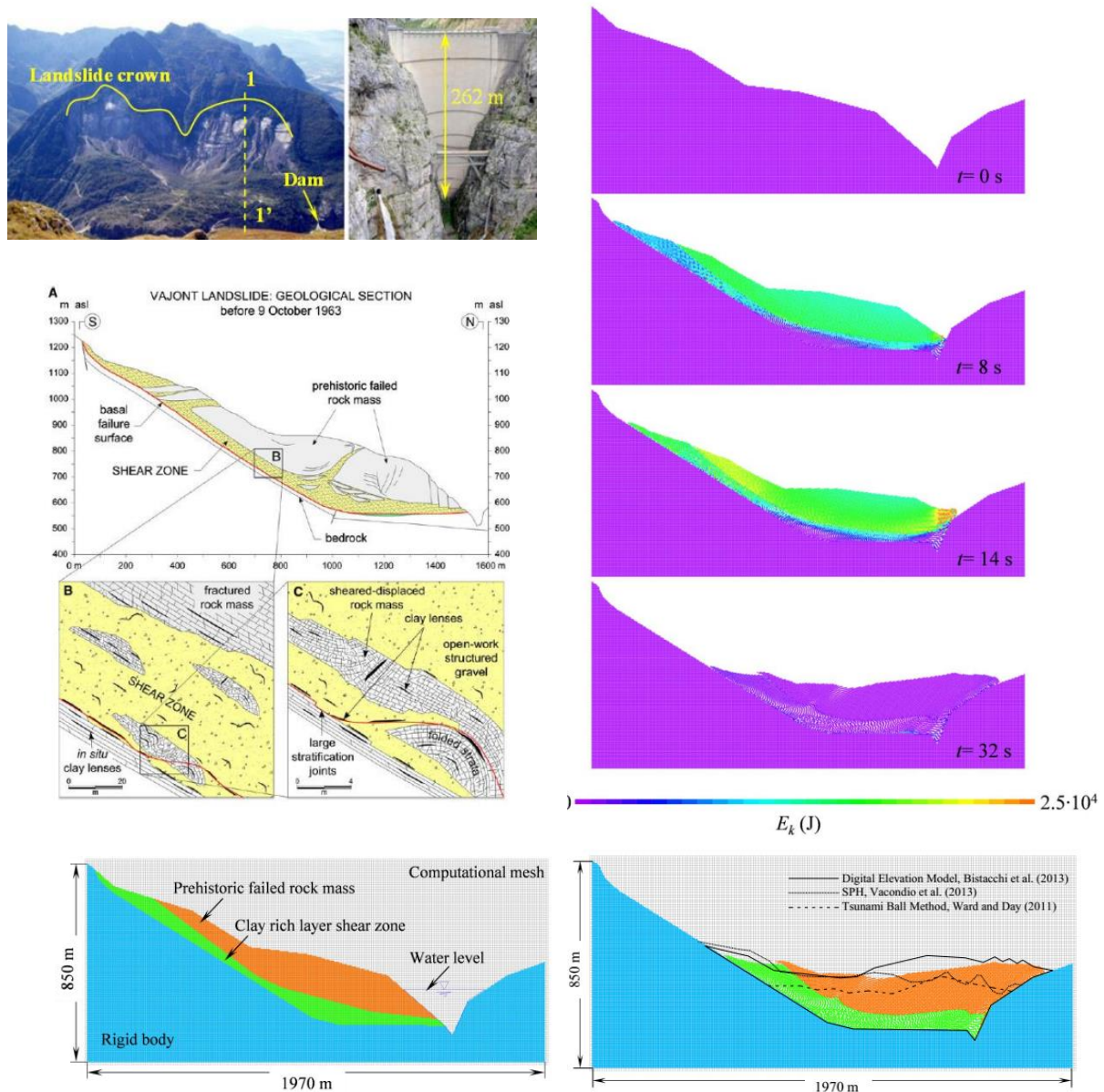


Figura 18: Modelación real de deslizamiento de un talud (Deslizamiento Vajont) en 2D con MPM.

Los resultados mostrados (Figura 3-18) forman parte de las diferentes tesis de grado, maestría y doctorado (Anexo V) que integran la propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba. Una explicación detallada de los estudios realizados en cada caso, se encuentra en los informes técnicos parciales y finales de cada uno de los proyectos, donde se aplicaron las técnicas numéricas de modelación con MPM (Anexo VI). Los aspectos más relevantes de estas investigaciones (1 - Formulación de MPM en problemas de sólidos – geomecánica -, 2 - Acoplamiento con otros métodos y 3 - Formulación del método MPM con modelos constitutivos de avanzada para geomateriales) forman parte de las publicaciones de alto nivel realizadas (Anexo IV). Como aspectos más relevantes se reportan publicaciones en las revistas *Canadian Geotechnical Journal*, *Landslides*, *Geotechnical Testing Journal*, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, *Applied Mechanics and Materials*, y *Geomech. Eng.*, que son revistas de alto índice de impacto, donde se incluye la revista de más índice de impacto en la temática de geotecnia (*Canadian Geotechnical Journal*).



## 6.2 – Ejemplificación de aplicaciones del método SPH.

Las principales aportaciones al método SPH son la formulación del mismo para problemas de mecánica de sólidos. Adicionalmente se hacen aportaciones en CFD y acoplamiento entre SPH y otros métodos numéricos. Se establecen técnicas de refinamiento dinámico adaptativo y se introducen técnicas de estabilización numérica en la formulación del mismo. Las principales aplicaciones van dirigidas a problemas de geomecánica. El haber trabajado con problemas de fluido y de mecánica de sólidos posibilitó establecer una formulación multifísica para resolver problemas acoplados: 1 - Fluidos y sólidos en regiones diferentes o 2 – Fluido y sólido en una misma región. La implementación de diferentes modelos constitutivos de avanzada para el caso de fluidos y sólidos (geomecánica) es un aspecto singular en los aportes realizados al método SPH.

Las aplicaciones de estas formulaciones (SPH) se efectuaron en diferentes proyectos que se ejecutaron o están en funcionamiento en este momento (Anexo VI). En este sentido se resuelven problemas de CFD (Figura 19) y sólidos en grandes deformaciones con refinamiento dinámico adaptativo que es un aporte de esta investigación. La modelación de la ruptura de una columna de agua durante el proceso de apertura de una compuerta es uno de los fenómenos estudiados con SPH (Figura 20). En esta investigación se comparan los resultados experimentación y modelación numérica efectuada con SPH (Figura 20).

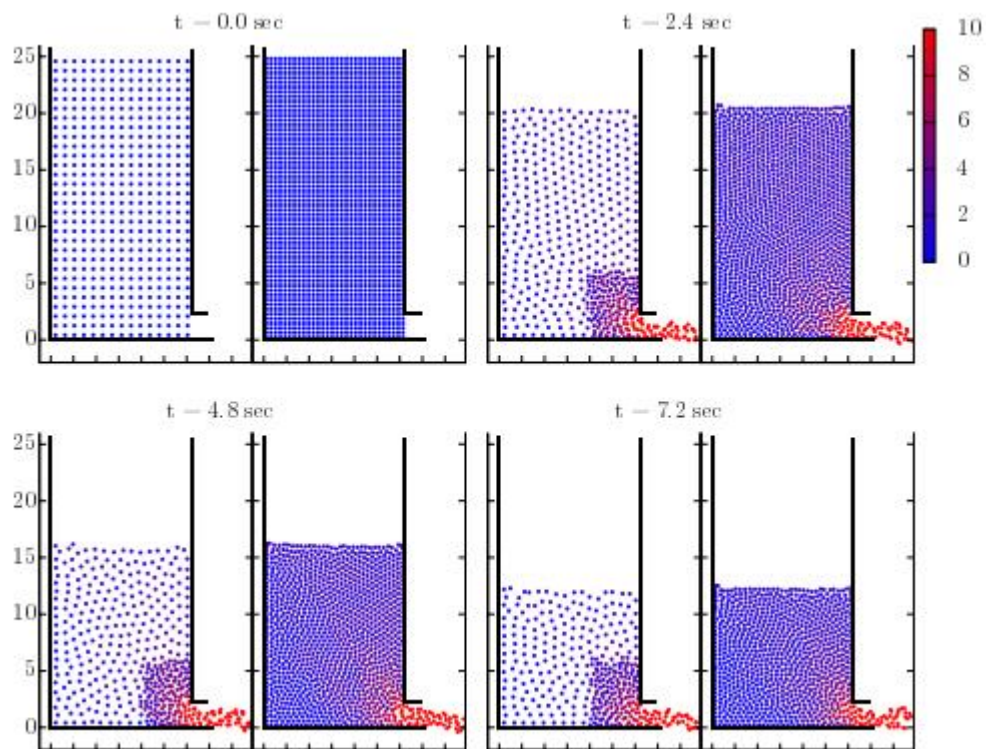


Figura 19: Modelación de problemas de fluido con SPH y refinamiento dinámico de mallas.

Las primeras aplicaciones del método SPH en modelación de sólidos fue trabajar a escala reducida modelando diferentes ensayos. Uno de estos ensayos es la compresión no confinada (Figura 21 y 22) y su comparación con métodos establecidos (FEM) o estudios experimentales. Otros de los ensayos realizados es la modelación del ensayo brasileño o tracción indirecta donde se emplea el método SPH con un modelo constitutivo de daño para modelar el geomaterial (Figura 23)



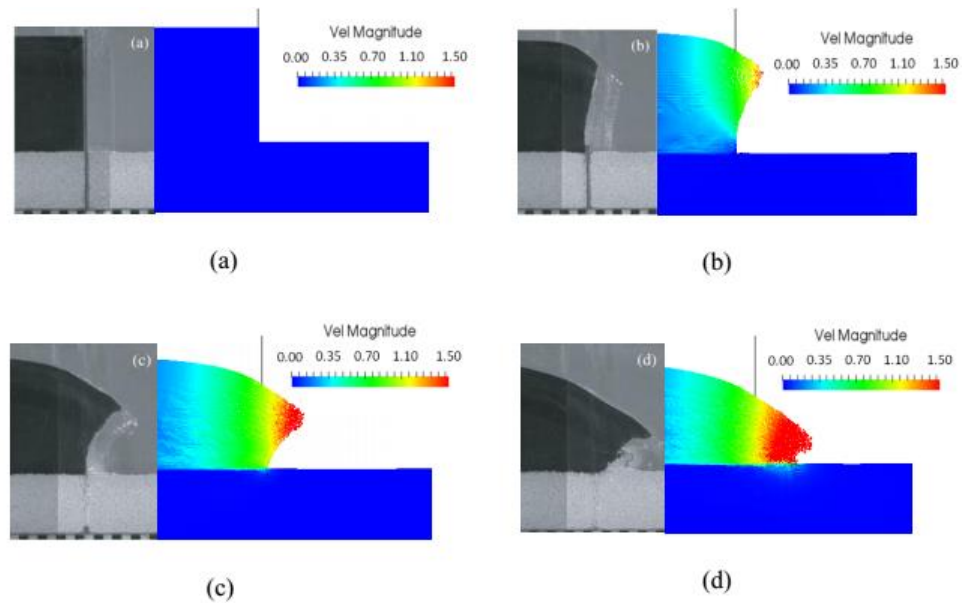


Figura 20: Modelación de la ruptura de una columna de agua durante el proceso de apertura de una compuerta. Experimentación y modelación con SPH. a)  $t=0.0$  s, b)  $t=0.05$  s, c)  $t=0.10$  s, d)  $t=0.15$  s

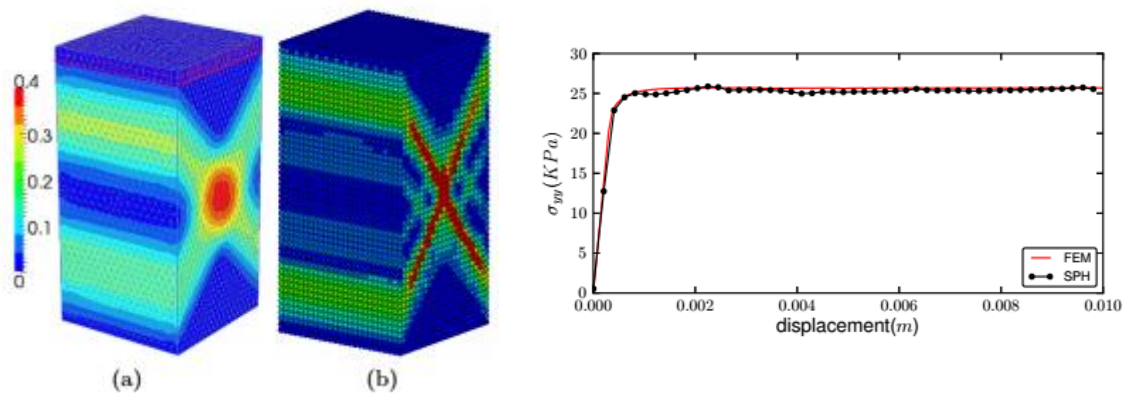


Figura 21: Modelación de un ensayo de compresión con MEF (a) y SPH (b).

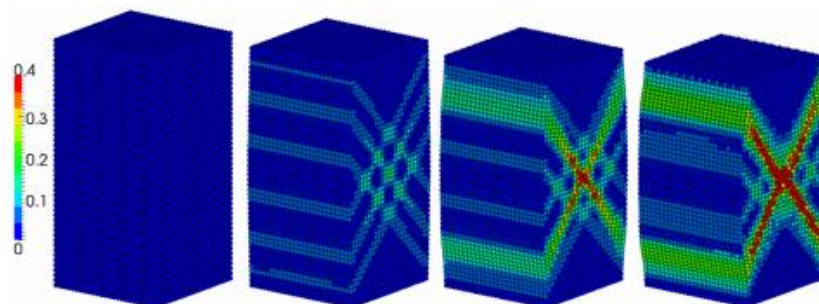


Figura 22: Evolución de comportamiento del ensayo de compresión modelado con SPH.

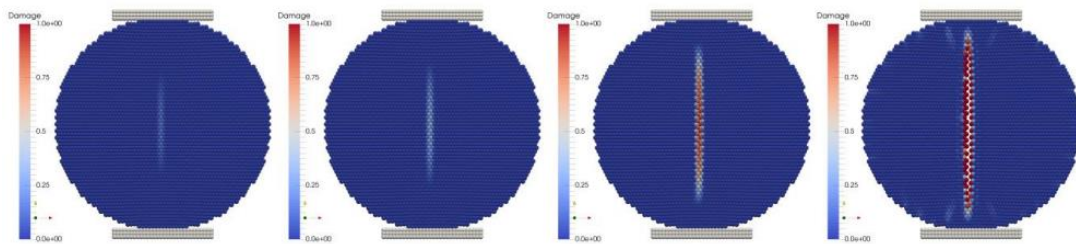


Figura 23: Modelación de Ensayo brasilero con método SPH y modelo de Daño.

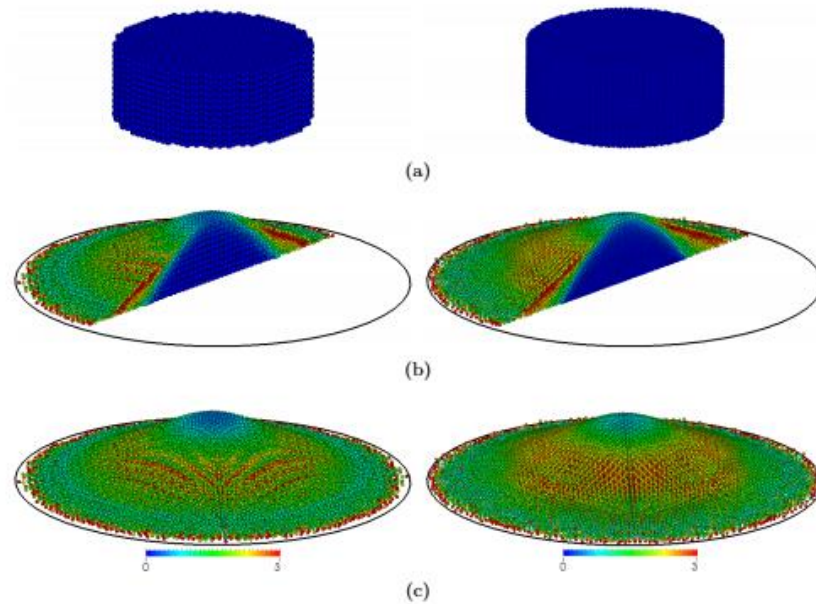


Figura 24: Modelación de colapso de una masa de suelos (no cohesivo) 3D con SPH empleando refinamiento dinámico.

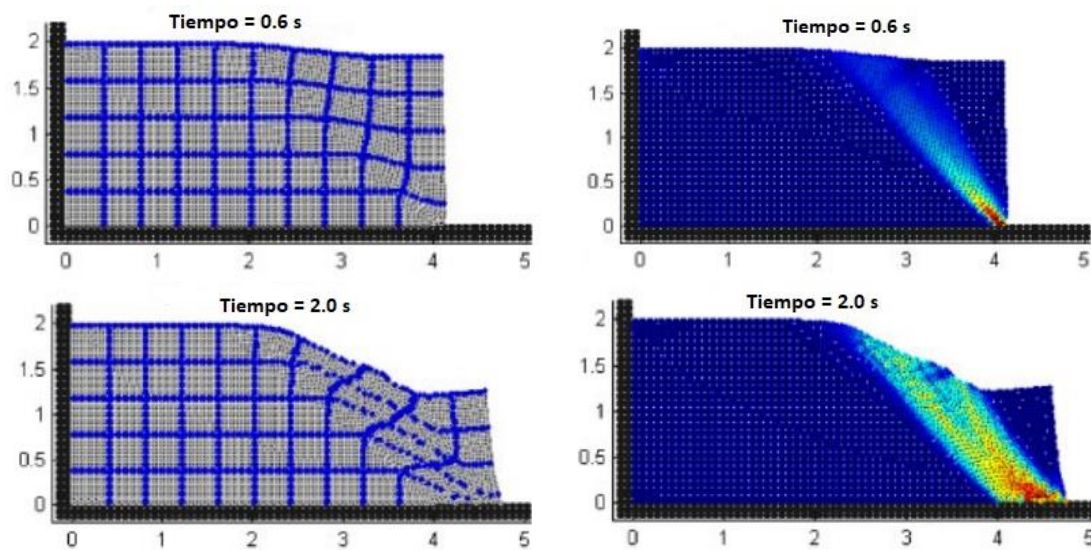


Figura 25: Experimentación y modelación de falla de una columna de suelo con método SPH.

La modelación de colapso de una masa de suelos (no cohesivo) en 3D con el método SPH acoplado a la técnica de refinamiento dinámico ha sido otro de los aspectos abordados en la investigación (Figura 24). El caso de suelos cohesivos también ha sido investigado a través del estudio del colapso de una columna de suelo (Figura 25 y 26). En algunos casos (Figura 25) se comparan resultados experimentales con los obtenidos con el método SPH. Investigaciones paralelas han estado encaminadas a la modelación del proceso de desecación de suelo (Figura 27).

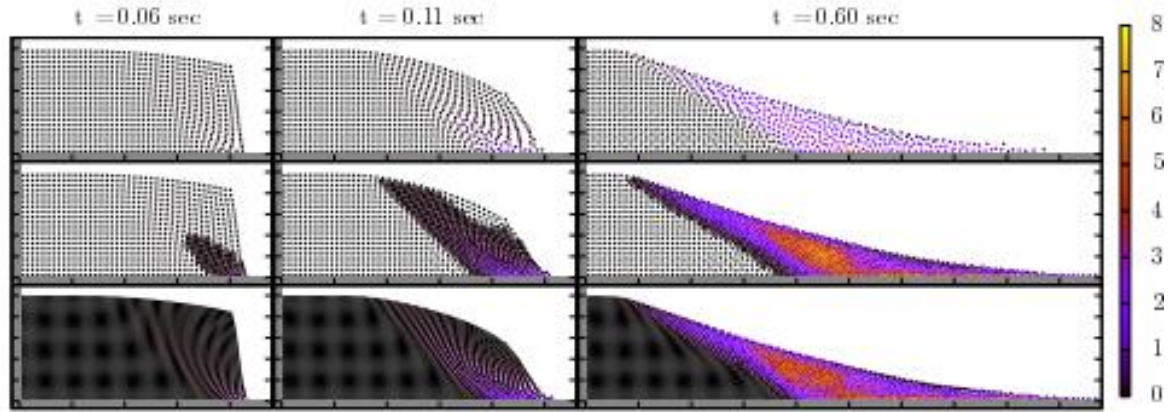


Figura 26: Modelación de colapso de una masa de suelos (no cohesivo) 2 D con SPH empleando refinamiento dinámico.

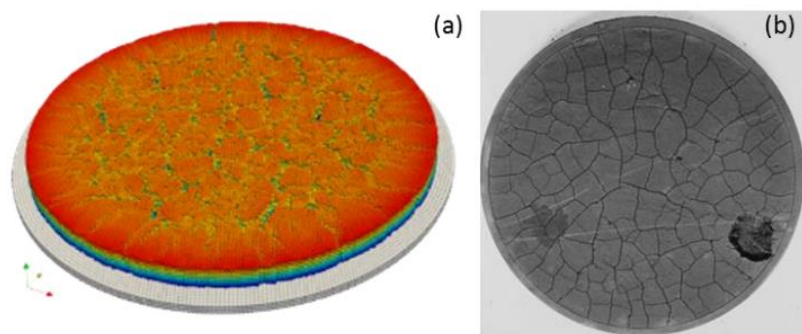


Figura 27: Modelación de desecación del terreno con el método SPH.

La formulación de SPH establecida para mecánica de sólidos no ha escapado de las investigaciones en temas de dinámica estructural (Figura 28). Estos estudios forman parte de algunos proyectos nacionales e internacionales (Anexo VI) de dinámica de las estructuras (Figura 28).

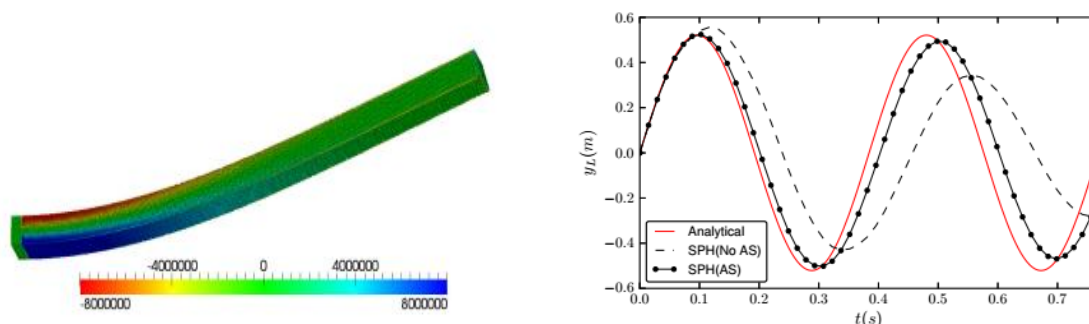


Figura 28: Modelación estructural de una viga con método SPH.

La mecánica de suelos no ha quedado ajena a empleo del método de SPH. En este caso se han acometido estudios del proceso de emplazamiento dinámico modelado con el método de SPH acoplado



con FEM (Figura 29). Este aspecto disminuye el costo computacional en la simulación de este complejo problema de ingeniería geotécnica. Otro de las investigaciones realizadas es el estudio de la capacidad de carga de una cimentación (Figura 30). En este caso se comparan los resultados obtenidos por SPH con las formulaciones analíticas y numéricas (FEM).

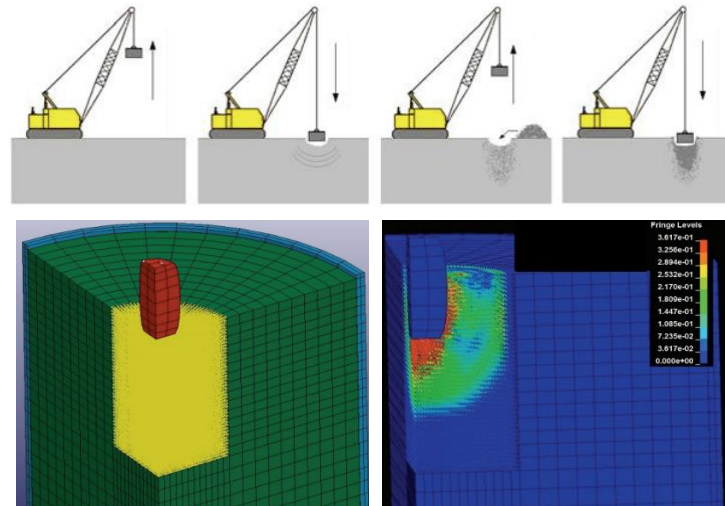


Figura 29: Proceso del método de emplazamiento dinámico en suelo. Modelo numérico acoplado SPH + FEM para el proceso de creación de orificios por Método de emplazamiento Dinámico

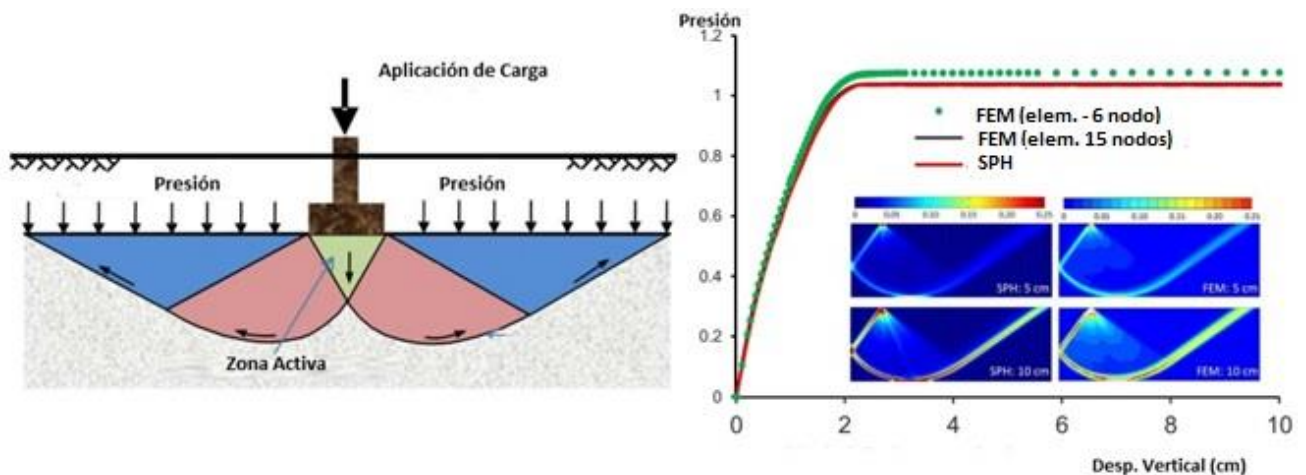


Figura 30: Modelación de la capacidad de carga de una cimentación superficial con FEM y SPH.

Los estudios de interacción suelo-estructuras en ingeniería vial tampoco han estado ajena a las investigaciones acometidas. Se han efectuado investigaciones relacionadas con la interacción neumático suelo (Figura 31) con una óptica de ingeniería civil e ingeniería agrícola. Estos resultados como los enunciados con anterioridad forman parte de diferentes proyectos de investigación nacional e internacional (Anexo VI). En alguno de los casos investigados se ha acoplado el método SPH con FEM para disminuir el costo computacional de las simulaciones y apalear un poco la problemática de mecánica del contacto. La modelación de problemas de grande deformaciones de deslizamiento de taludes y laderas forma parte de las investigaciones realizadas. En este caso se han contrastado los resultados obtenidos entre el método SPH y FEM (Figura 32).

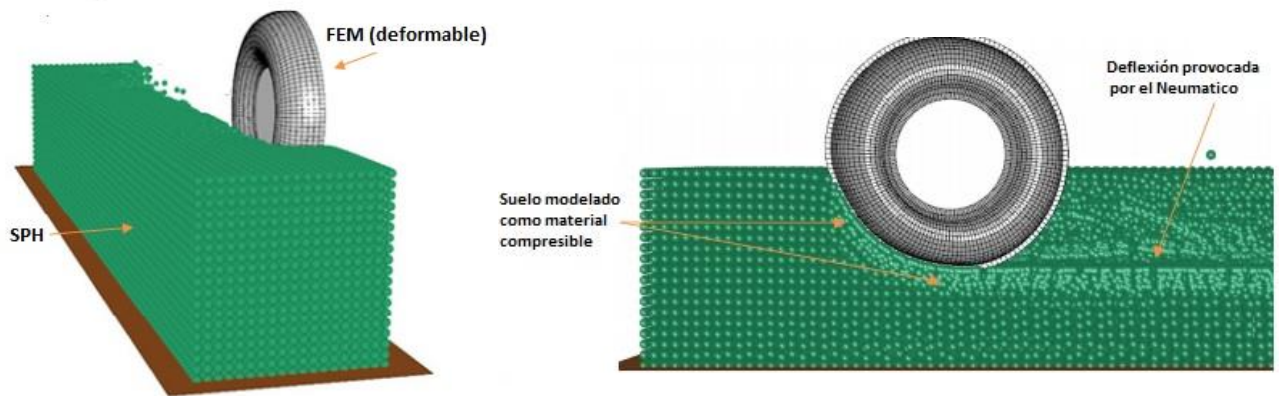


Figura 31: Modelación del efecto de interacción neumático suelo con SPH/FEM.

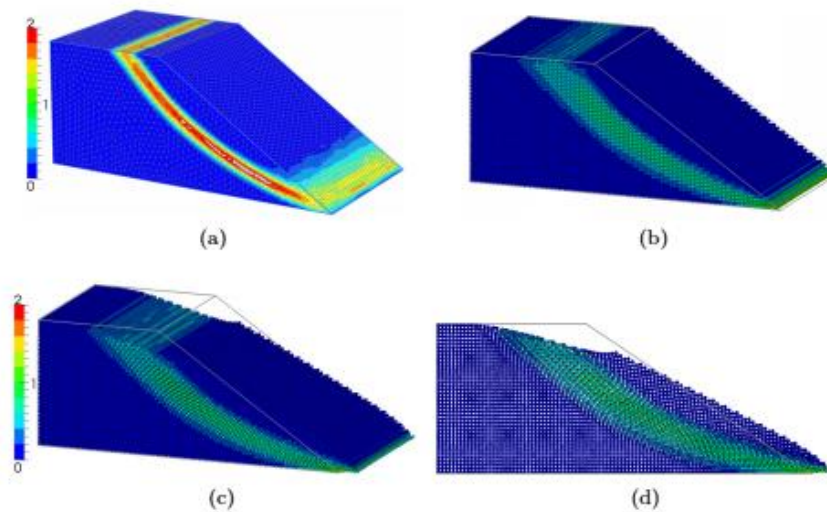


Figura 32: Modelación de deslizamiento de un talud con FEM (a y b) y SPH (c y d).

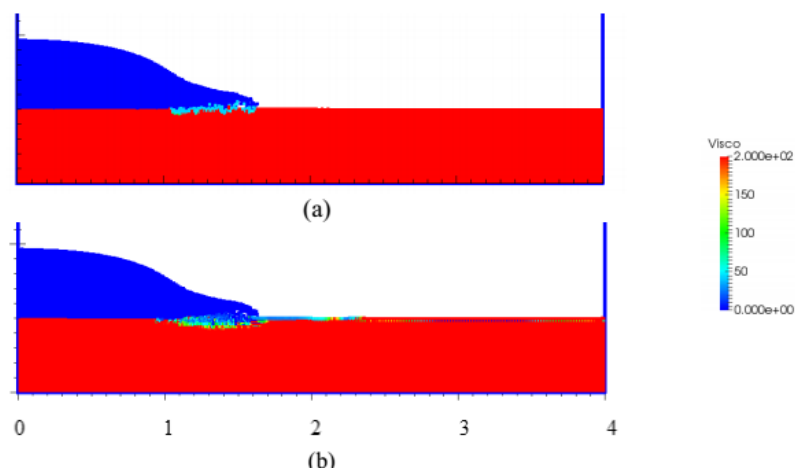


Figura 33: Aplicación del método SPH en la modelación de problemas de erosión de suelo, a) Criterio de Shield y b) Criterio de Drucker-Prager.

La formulación acoplada del método SPH para resolver problemas multifísicos (interacción fluido sólido en un mismo dominio) es otro de los aportes realizados (Figura 33, 34 y 35). Estos resultados forman parte de una tesis doctoral y de un proyecto europeo (Anexo VI) donde han participado los autores de esta propuesta de premio.

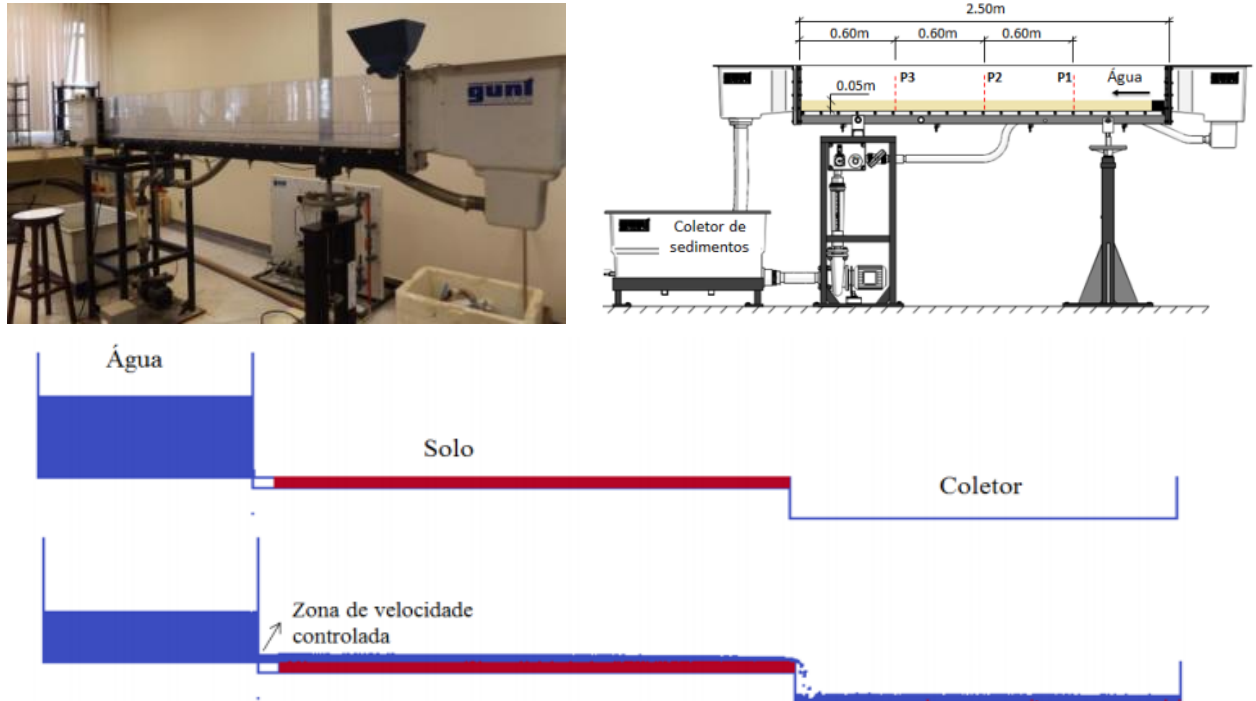


Figura 34: Modelación de un canal hidráulico a escala de laboratorio con SPH. Modelación de erosión de suelos.

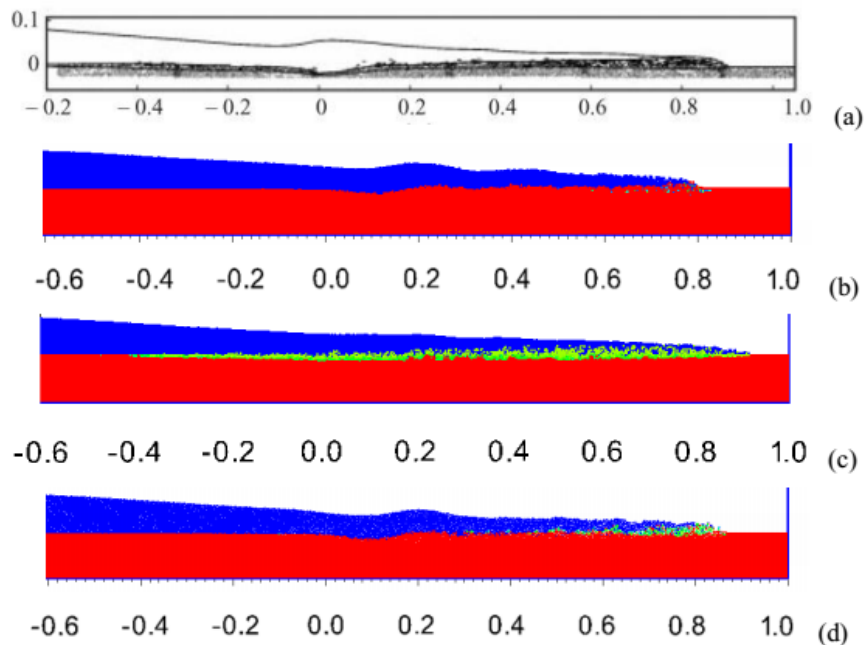


Figura 35: Modelación de proceso de erosión de suelos con SPH. a) Resultados Experimentales, b) Modelación con SPH empleando criterio de DruckerPrager c) Modelación con SPH empleando criterio de Shield y d) Modelación con SPH empleando criterio de DruckerPrager + Shield



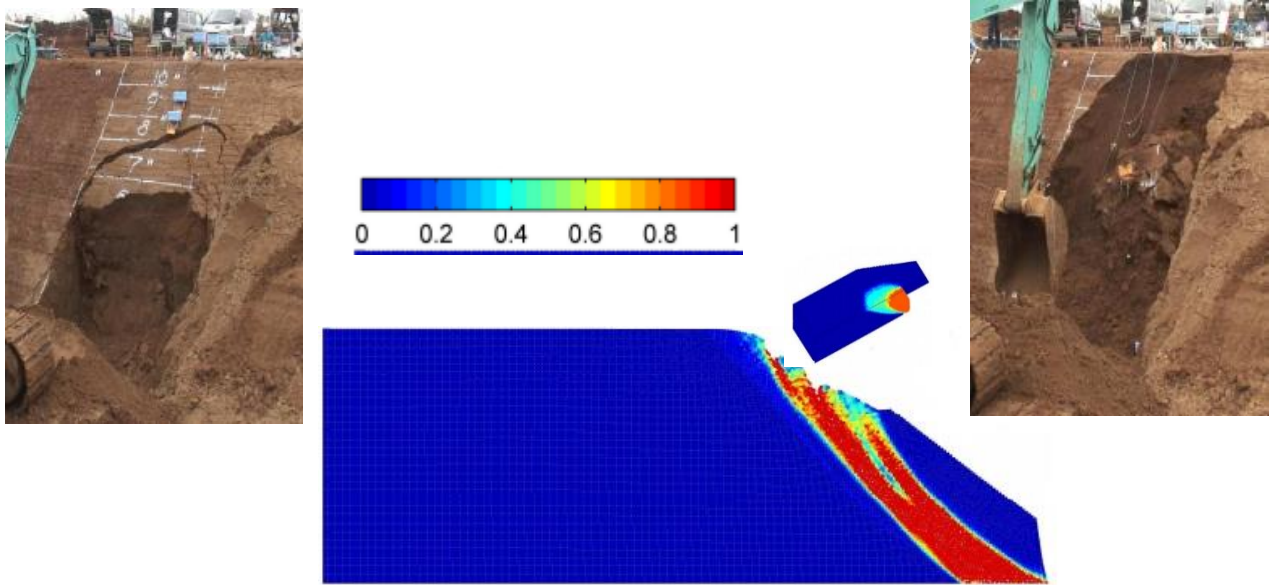


Figura 36: Modelado de experimentos de excavación a gran escala con SPH

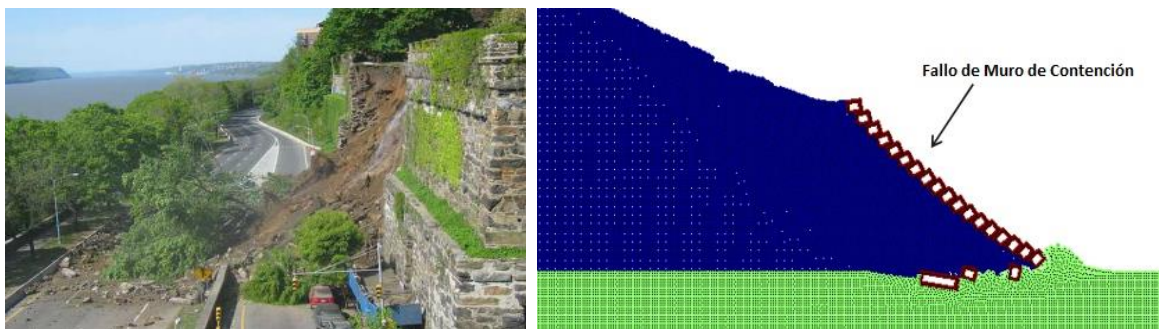


Figura 37: Modelación de fallos de muros de contención con SPH.

Los problemas geotécnicos de excavación a gran escala es otro de las temáticas abordadas con la formulación del método SPH (Figura 36), al igual que los estudios de fallos de muros de contención (Figura 37). Paralelamente y tomando en cuenta la similitud de problemáticas se ha abordado con SPH problemas de presas de tierras (figura 38) y obras subterráneas o túneles (Figuras 39 y 40). Estos estudios guardan estrecha relación con varios proyectos nacionales e internacionales acometidos o en fase de ejecución (Anexo VI).

La modelación de problemas de balística de efecto y blindaje es otra de las actividades que se acometen como parte de esta investigación. Estos trabajos tienen relación directa con algunos proyectos de interés nacional del Ministerio de las Fuerzas Armadas y se ejecutan en el proyecto Tarea Triunfo. El método SPH se emplea para ejecutar modelaciones a escala macro de la mecánica computacional (Figura 41), mientras que para la escala micro se emplea el DEM.

La modelación de problemas de interacción fluido estructuras y los problemas estructurales, también ha sido abordada por el método SPH. Estos trabajos forman parte de proyectos internacionales y nacionales (Anexo VI) que se ejecutan en este momento. En esta dirección se ejecutan los trabajos relacionados con la modelación estructural de los aerogeneradores y los estudios de CFD (Figura 42).

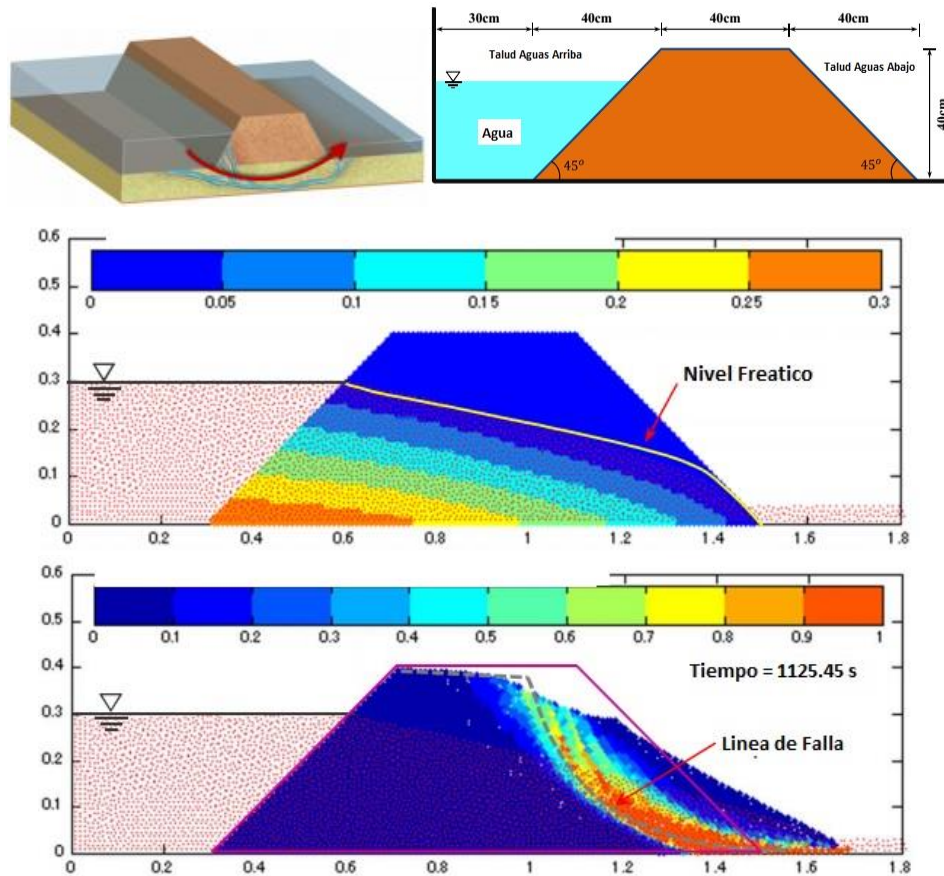


Figura 38: Modelación del Presas de tierras con SPH.

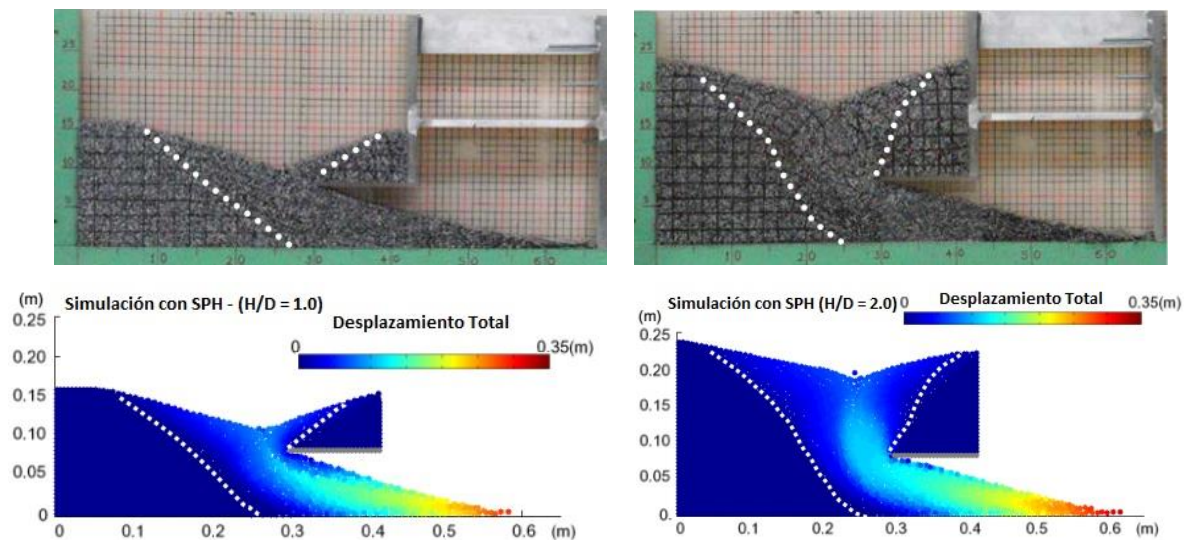


Figura 39: Simulación a escala de laboratorio de la falla de túneles con SPH

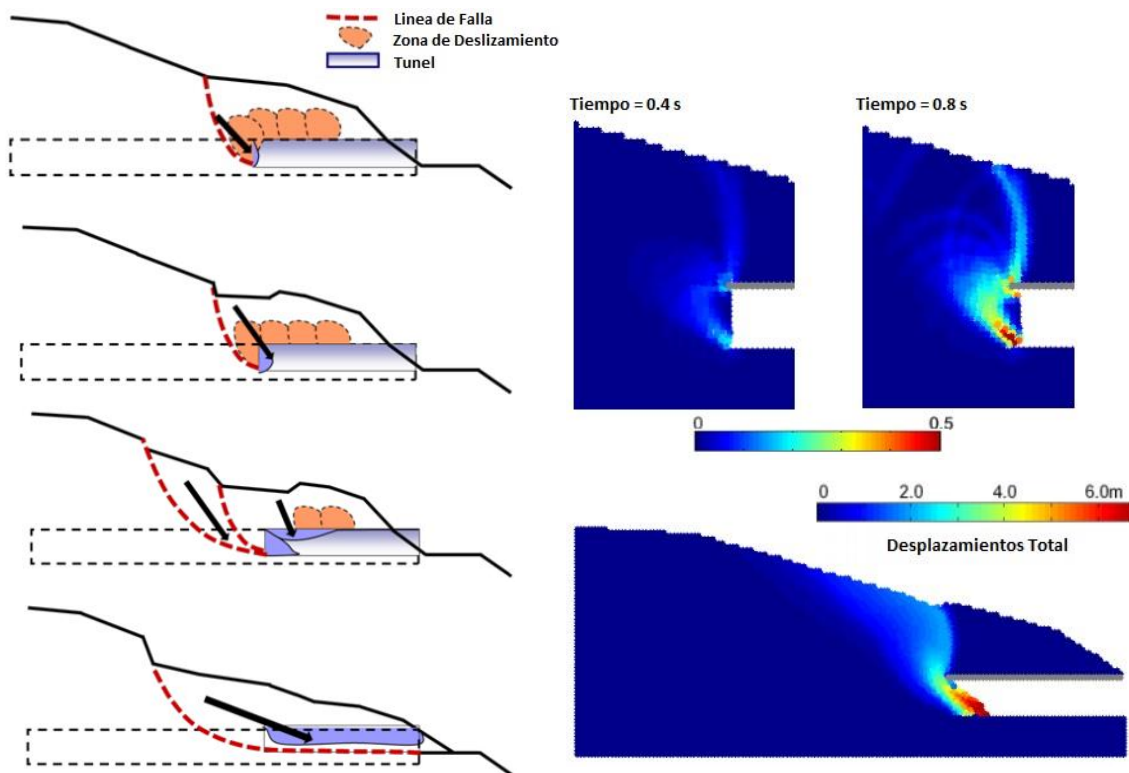


Figura 40: Modelación de obras subterráneas (túneles) con SPH.

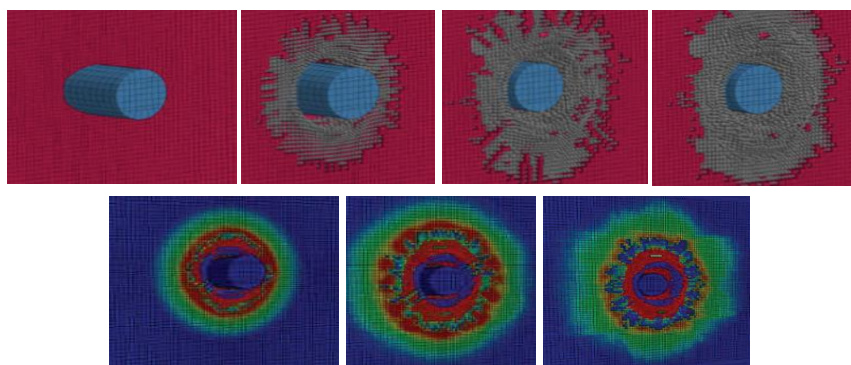


Figura 41. Modelación de impacto de proyectiles con SPH.



Figura 42: Modelación de aerogeneradores con SPH.





Los resultados mostrados (Figura 19-42) forman parte de las diferentes tesis de grado, maestría y doctorado (Anexo V) que integran la propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba. Una explicación detallada de los estudios realizados en cada caso, se encuentra en los informes técnicos parciales y finales de cada uno de los proyectos, donde se aplicaron las técnicas numéricas de modelación con SPH (Anexo VI). Los aspectos más relevantes de estas investigaciones (1 - Formulación del método SPH para mecánica de sólidos, 2 – Desarrollo de técnicas de refinamiento dinámico adaptativo, 3 – Acoplamiento de SPH con otros métodos, 4- Formulación de SPH para estudios multifísicos – ejemplo: erosión de suelos – 5 - Implementación de modelos constitutivos de geomateriales y fluidos en SPH) forman parte de las publicaciones de alto nivel realizadas (Anexo IV). Como aspectos más relevantes se reportan publicaciones en las revistas: *Computational Mechanics*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, que son revistas de alto índice de impacto. De igual modo se ha publicado los resultados en las memorias de congresos reconocido prestigio internacional: 1 - *36th Woudschoten Conference*, Zeist, The Netherlands. October 5-7, 2011, 2 - *II International conference on Particle-based Methods Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain. October 26-28 2011, 3 - *19th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM 2011)*, Warsaw, Poland. May 9-12 2011, 4 - *7th International SPHERIC Workshop*, Prato, Italy, May 29-31 2012, 5 - *EuroSciPy 2012*, Brussels, Belgium. August 27-30, 2012, 6 - *9th SPHERIC International Workshop*, Paris, June 2-5, 2014, 7 - *Workshop on Application of Smoothed Particle Hydrodynamics in Environmental Engineering and Geosciences*, Karlsruhe, Germany (Anexo VI).

### 6.3 – Ejemplificación de aplicaciones del método DEM.

Las principales aportaciones al método DEM son la formulación del mismo para problemas de mecánica de sólidos. En este sentido el aspecto más importante es la formulación genérica de DEM para resolver problemas de multifísica y multiescala. Se destacan la solución de problemas termomecánico acoplado incluido la simulación de desgaste. Otros aspectos singulares son la formulación varios modelos constitutivos de contacto y la estimación de parámetros de los mismos, incluidos la relación con los parámetros constitutivos macro convencionales. El acoplamiento del DEM con otros métodos es otro aspecto aportado, lo cual mejora el rendimiento y costo computacional de las simulaciones. Las principales aplicaciones van dirigidas a problemas de geomecánica y otras áreas de interés.

Las aplicaciones de estas formulaciones (DEM) se efectuaron en diferentes proyectos que se ejecutaron o están en funcionamiento en este momento (Anexo VI). En los proyectos de cooperación entre CIMNE y UCLV se desarrollan las investigaciones básicas del desarrollo de esta formulaciones (DEM). En los mismos se desarrollan todos los aspectos de generación, evaluación de las mallas de partículas, simulación física, paralización y visualización científica. Por su parte los proyectos de cooperación entre UnB y UCLV son otra alternativa que se desarrolla para el desarrollo del DEM. En este último caso los estudios van encaminado hacia aspectos experimentales y numéricos para validar el método (DEM) en problemas geo-mecánico.

En varios proyectos nacionales que se ejecutan o están en funcionamiento se hacen tareas científicas enfocadas a la aplicación de este método (DEM) a diversos problemas de ingeniería. El proyecto Tarea Triunfo hace uso de estas tecnologías para estudiar problemas de balística de efecto y blindaje. El proyecto de modelación micro-estructural (9169) es el homólogo nacional de los proyectos de cooperación con UnB y CIMNE. La modelación de la penetración de los iones cloruros en la masa de hormigón no ha quedado ajena al abordaje de DEM y el proyecto 9178 está enfocado en esta dirección para realizar estudios de esta problemática a escala micro. Por su parte en el Proyecto TecnoAvanFerro



(9708) se aplican varias técnicas numéricas incluidas el DEM para modelar problemas de interacción vía balasto.

Dentro de los proyectos internacionales concluidos (CUTTER, PARAMIX I, PARAMIX II, Ciudad Multidimensional, TUNCONST, VLIR Iniciativa propia, XLIDE, ACUÑA, SAFECON) se aplicaron diferentes técnicas numéricas incluidas el DEM para resolver complejos problemas de ingeniería. En el proyecto CUTTER se estudió el problema desgates de herramientas de corte de diferentes equipos de excavación cuando interactúan con el terreno. El proyecto PARAMIX I y II se centró en el estudio de interacción suelo-estructura ante el efecto de cargas estáticas y dinámicas. Los proyectos Ciudad Multidimensional y TUNCONST abordó el tema de la simulación de la construcción y explotación de obras subterráneas. Otra alternativa del uso de las técnicas numéricas fue el proyecto XLIDE donde se emplean las mismas para análisis de estabilidad de taludes y laderas con potencial riesgo sobre infraestructuras. Los estudios de erosión en balsas de materiales sueltos ha sido abordada con métodos numéricos (MPM, SPH y DEM) de avanzada con resultados alentadores, al igual que los problemas de interacción fluidos estructura (Proyecto SAFECON).

En los proyectos internacionales (VLIR- Vibras, 4 Proyectos CAPES y 2 CNPq con UnB/Brasil) que se ejecutan (Anexo VI) se desarrollan y aplican diferentes técnicas numéricas que forman parte de esta propuesta de premio. El DEM es uno de los métodos que es objeto de aplicación en estos proyectos. En el proyecto VLIR-Vibras las aplicaciones van dirigidas a la simulación de los problemas de dinámica estructural. En el proyecto desarrollo de tecnologías de avanzada de modelación con partículas (DEM) se enfoca en varias aplicaciones incluido simulación de problemas de geomecánica. En uno de los proyectos de CNPq se enfoca la aplicación del DEM en la modelación de problemas de ingeniería del petróleo y en otros en la simulación de aerogeneradores. Los estudios a pavimentos y terraplenes no escapan a las aplicaciones del DEM en estas temáticas. En este sentido se desarrolló un proyecto CAPES/MES para la modelación y diseño de terraplenes y pavimentos empleando diversas técnicas numéricas. En los estudio de riesgo por deslizamiento de taludes y laderas, es otro de los proyectos que se ejecutan con UnB/Brasil y donde se hacen uno de las diferentes tecnologías numéricas de avanzadas incluida el DEM. Otro de los problemas geotécnicos abordados es el estudio de comportamiento resistente y deformacional de pilotes bajo el efecto de cargas laterales. En este proyecto se emplea principalmente el método MPM y DEM en la modelación de cimentaciones profundas.

Como parte de esta investigación se ejecutan otros proyectos (MONICAB, ICEBREAKER, NICE-SHIP, SimPhoNy, VOLADPAT, PARTING, BALAMED). El proyecto MONICAB emplea el DEM para modelar la contaminación de balasto en líneas de ferrocarril de alta velocidad. Por su parte el proyecto ICEBREAKER y NICE-SHIP modelan con métodos de partículas (incluido el DEM) la interacción hielo embarcación. La modelaciones con métodos de partículas a nivel de la micro y nano escala se ejecutan en el proyecto SimPhoNy. El abordaje de problemas de geomecánicos se desarrolla en los proyectos VOLADPAT y PARTING. En el proyecto VOLADPAT se estudia la problemática de voladoras y en PARTING otros problemas geomecánicos convencionales. BALAMED es un proyecto que emplea el DEM para la modelación numérica del conjunto carril-travieza-balasto y es el proyecto internacional homólogo del proyecto nacional TecnoAvanFerro (9708).

El primer proyecto nacional, que propicio el desarrollo de las técnicas de avanzada, para la modelación micro-estructural de los materiales (Anexo VI), fue un proyecto que recibió el apoyo del Ministerio de la Construcción de Cuba. Este proyecto de investigación básica, es un proyecto homólogo de los proyectos internacionales de cooperación, que se disponen con el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE). En este sentido es un proyecto que guarda relación directa con los proyectos: *GenPaking-Particle*, *Sim-DEM*, *Visual Particle* y *Parallel Particles* (Anexo VI).

Las primeras aplicaciones básicas desarrolladas, fueron muy elementales. En un caso fue modelar a escala macro ensayos mecánicos de materiales (Figura 43-50) y en otra caso resolver problemas de mezclas de materiales (Figura 51). Otra de las aplicaciones preliminares fue el uso de las tecnologías de partículas al caso de operaciones con áridos usando en la construcción (Figuras 52 y 53). En todos estos estudios e investigaciones básicas, se tuvo que hacer uso de las tecnologías de avanzada de modelación física con métodos de partículas (DEM), entre otras técnicas colaterales presentadas en esta propuesta de premio. Muchos de los ensayos ilustrados en este trabajo son parte de las etapas de caracterización de materiales de los proyectos CUTTER y TUNCONSTRUCT (Anexo VI).

Los primero estudio, como es lógico fueron ensayos a escala de materiales. El objetivo en este caso es ilustrar mediante estudios aplicados a diferentes problemas de ingeniería, la efectividad del DEM como método de simulación numérica. Con esta finalidad se realizan los siguientes estudios: Simulación de ensayos de compresión y tracción, Simulación de ensayos de tracción indirecta o ensayo brasileño, y Simulación de problemas de interacción herramienta de corte-terreno acoplados con problemas de desgaste, entre otros.

La Figura muestra la prueba de compresión sin confinamiento llevada a cabo en el laboratorio. Las muestras de roca de igual altura y diámetro de 50 mm fueron usadas de acuerdo al protocolo de las normativas nacionales e internacionales. En la parte derecha de dicha figura, se puede observar el modo de fallo de la muestra de roca bajo carga de compresión.



Figura 43. Ensayo de compresión de la roca.

La modelación numérica del ensayo a compresión, es efectuada aplicando el método de los elementos discretos. En la Figura 44 se evidencia la evolución del fallo en el espécimen obtenido en la simulación. La comparación entre la Figura 43 y la Figura 44 muestra que el análisis numérico proporciona un modo de fallo similar al observado en los experimentos con roca frágil. La relación tensión-deformación se muestra en la Figura 45.



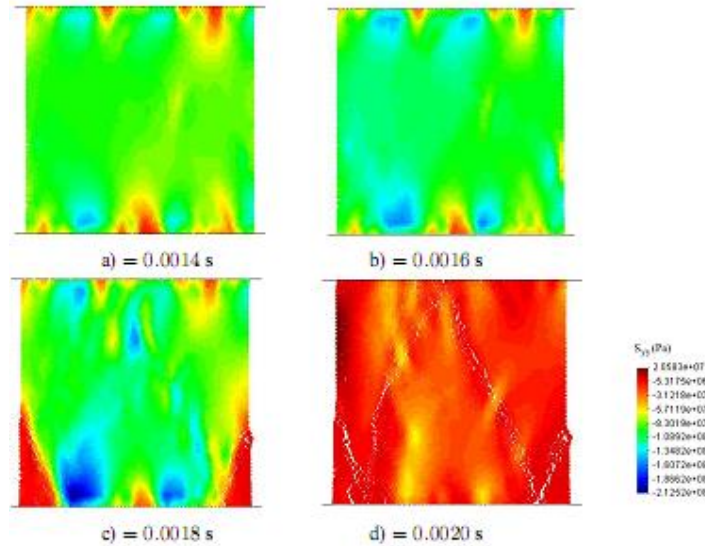


Figura 44. Simulación de la prueba de compresión. Evolución del fallo con distribución de la tensión.

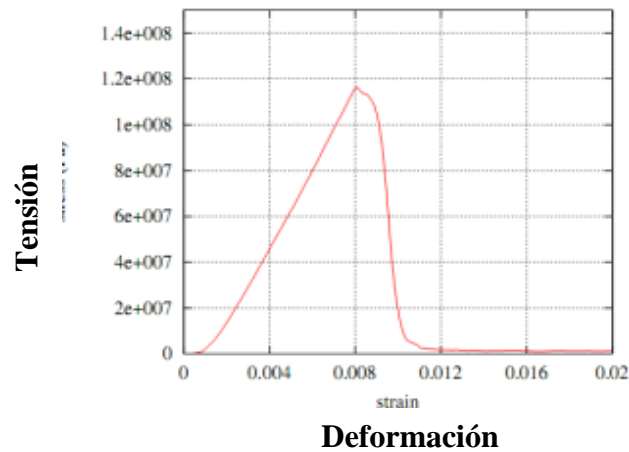


Figura 45. Curva tensión-deformación del ensayo a compresión.

Otra simulación virtual que se ilustra a modo de ejemplo de aplicación, es la realización de un ensayo brasileño (Figuras 46-50) que previamente se había realizado de forma experimental. En este caso las simulaciones numéricas se efectúan con el DEM.

Los resultados obtenidos con la aplicación del MED en la simulación virtual de este tipo de ensayo en la roca arenisca, respaldan la correspondencia de resultados, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. En la Figura 46 se ilustra la evolución del mecanismo de falla que se presenta en esta roca. Los resultados obtenidos por la simulación numérica reproducen fehacientemente la forma de rotura, y además existe concordancia en los resultados de tensión máxima de tracción obtenidos para este material, por la vía experimental y por la vía numérica. La diferencia obtenida por una u otra vía difieren en un 3 %, después de haber efectuado un estudio de calibración numérica del ensayo virtual. A modo ilustrativo se representan las isozonas de desplazamiento en ambas direcciones ( $x$  y  $y$ ). La representación de estos resultados (Figura 46-47) está realizada post-falla, y en la misma se detecta la discontinuidad física que existe en las isozonas de desplazamientos.

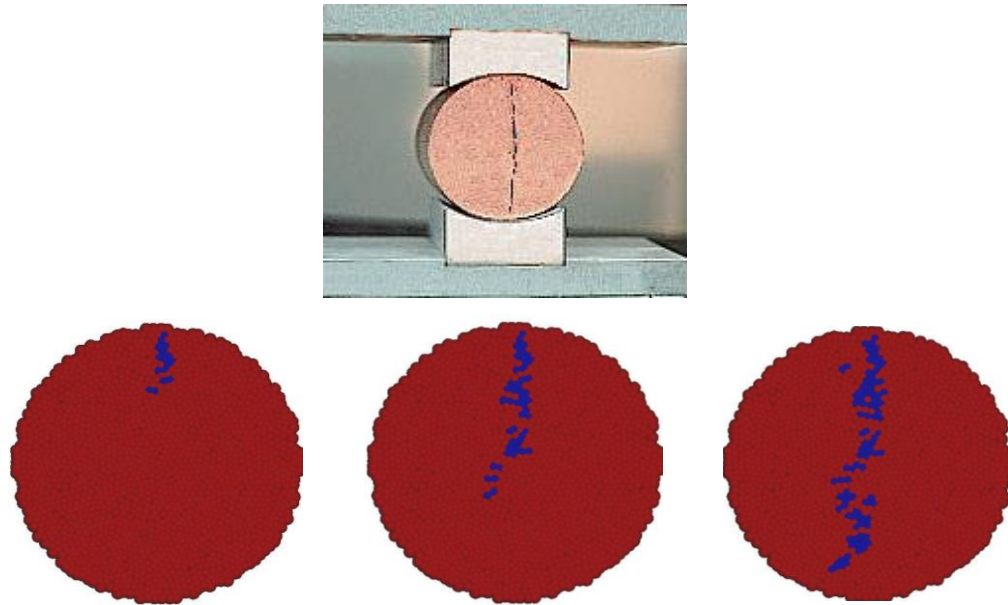


Figura 46. Resultado de la simulación de un ensayo de tracción indirecta en una arenisca. Resultados experimentales y formación, propagación y rotura del espécimen a nivel de simulación virtual empleando el MED.

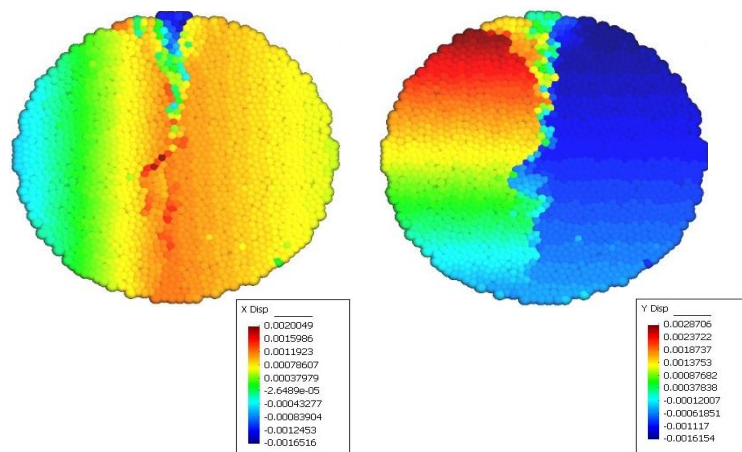


Figura 47. Desplazamientos ( $x$  y  $y$ ) en la simulación del ensayo brasileño en una arenisca.

Otra ensayo brasileño en otro tipo de roca ha sido efectuado y en la misma se emplea como malla inicial la obtenida por la formulación desarrollada. En el laboratorio se usaron muestras de diámetro igual a  $50\text{ mm}$  y altura (longitud) de  $25\text{ mm}$ . La configuración del laboratorio y el fallo de la muestra se presentan en la Figura 48. El modo de fallo obtenido en el análisis se muestra en las Figuras 49 y 50. Las distribuciones de la tensión en las direcciones paralela y normal a la carga correspondientes a las Figuras 49 y 50 concuerdan muy bien con las soluciones teóricas.

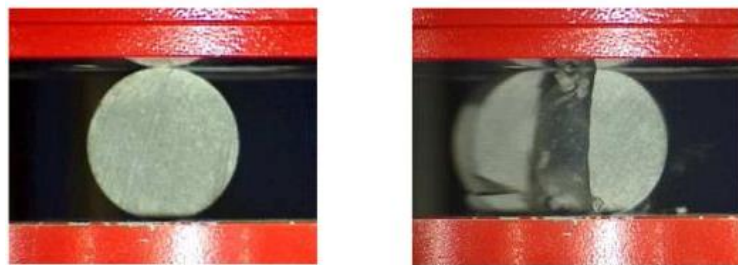


Figura 48. Ensayo brasileño. Muestra de roca antes y después de fallar.

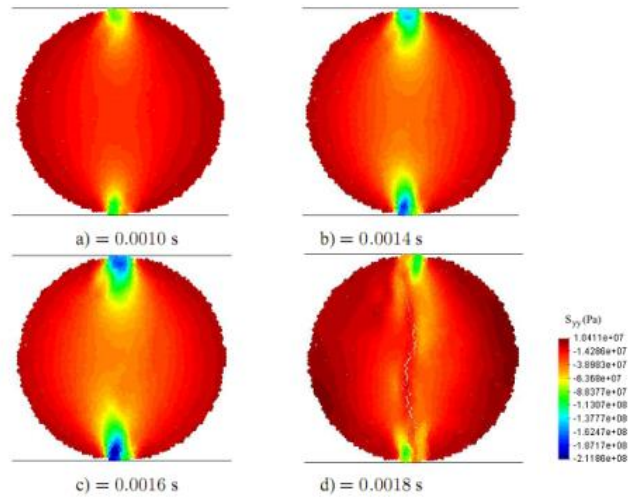


Figura 49. Ensayo brasileño. Falla de la muestra de roca, con la distribución de la tensión en la dirección de la carga.

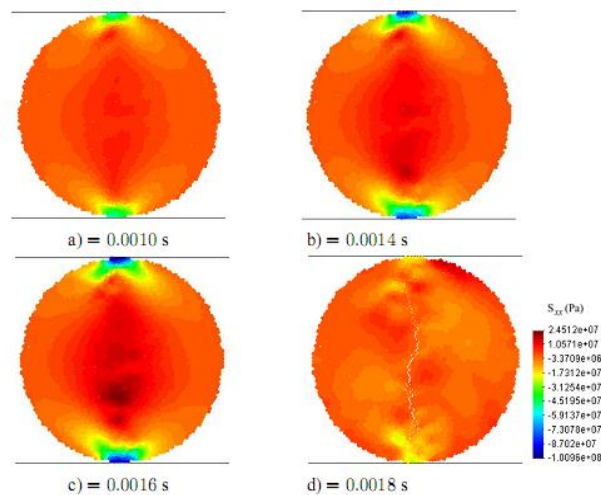


Figura 50. Ensayo brasileño. Falla de la muestra de roca, con la distribución de la tensión en la dirección normal a la de la carga.

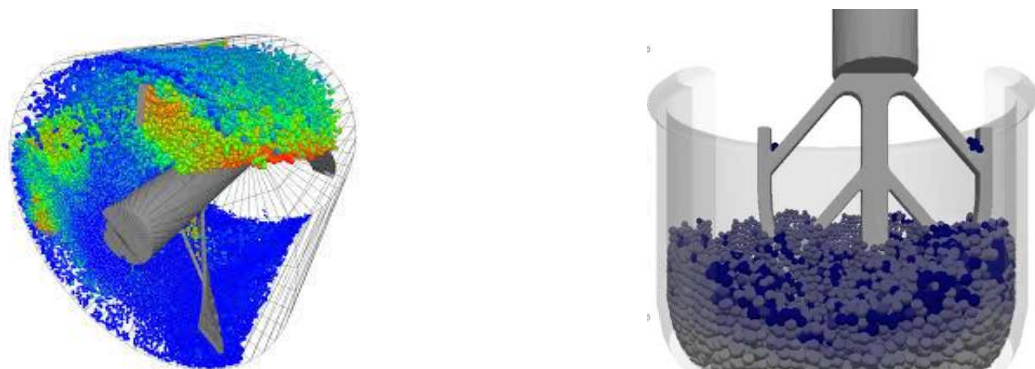


Figura 51. Simulación numérica de mezclas de materiales.

Las aplicaciones a mezclas de componentes (Figura 51) del métodos de los elementos discretos como ejemplo teóricos, es una de las aplicaciones más simples que se puede acometer con este método, siempre que no se incluya el efecto de quebras de partículas. En la Figura 51, se evidencia

simulaciones de mezclas de partículas, donde se emplea el método de partículas (DEM) para efectuar la simulación.

Otra aplicación de las técnicas de partículas, es el uso en operaciones con áridos en la construcción, ya sea en proceso de conformación (fabricación de áridos), carga y transporte (Figura 52 y 53). Estas simulaciones numéricas son muy fácil de realizar con el métodos de los elementos discretos, porque son modelaciones a escala macro de la mecánica computacional y el material esta suelto, lo que implica un modelo constitutivo de contacto friccional que es uno de los más simples.

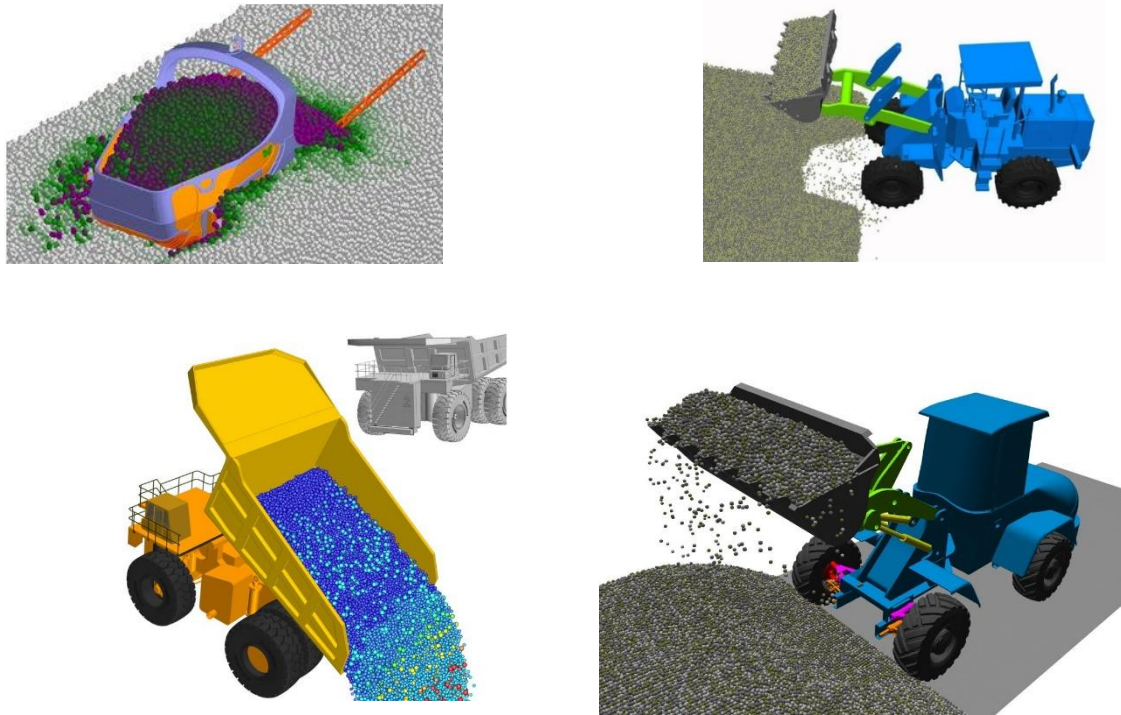


Figura 52. Simulaciones de operaciones de construcción con áridos.

Las aplicaciones prácticas más reales de este trabajo son aplicaciones que están estrechamente vinculadas a proyectos de investigación nacional e internacional. Los proyectos de cooperación (Anexo VI) con el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), han permitido desarrollar las bases matemáticas y computacionales, que con posterioridad fueron base para las aplicaciones que se presentan en esta propuesta de premio (Anexo VI). Dentro de los proyectos, que se hacen en cooperación con CIMNE, se pueden mencionar: 1 - *GenPaking-Particle*, 2 - *Sim-DEM*, 3 - *Visual Particle* y 4 - *Parallel Particles* (Anexo 6), los cuales son proyectos de investigación y desarrollo, los cuales, han garantizado el soporte tecnológico, para enfrentar futuros proyectos de aplicaciones tecnológicas y estudios de problemas de ingeniería (Anexo VI).



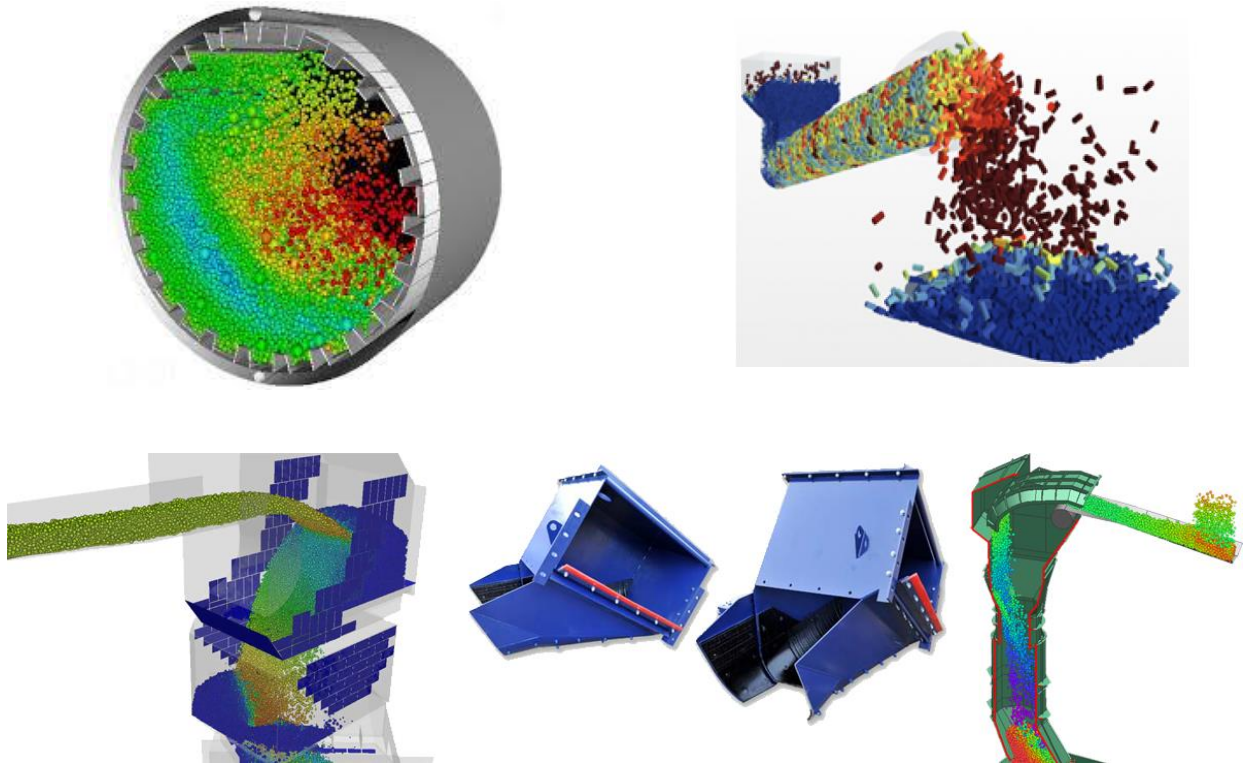


Figura 53. Simulación numérica de trituración de materiales en un molino y transporte de materiales.

Las primeras aplicaciones de las tecnologías de avanzada del método de los elementos discretos, se propiciaron en los proyectos internacionales: 1 – CUTTER, 2 - PARAMIX I, 3 - PARAMIX II, 4 – TUNCONSTRUCT, 5 – Ciudad Multidimensional (Anexo 6), que en su gran mayoría, son proyectos financiados por fondos Europeos o Españoles.

En el proyecto CUTTER, se aplicaron las técnicas de avanzada soportadas en el método de los elementos discretos, para la simulación de problemas de desgates en el proceso de interacción herramienta de corte-terreno. En estos estudios de simulación de desgaste e interacción herramienta-terreno, se efectúan varias alternativas de estudio: 1 - Ensayos de laboratorio para comparar el desgaste de los diferentes tipos de aceros, 2 - Ensayos de laboratorio controlados, para estimar los parámetros que caracterizan el desgaste, y que son necesarios para los procesos de simulación, 3 - Simulaciones de los ensayos de laboratorio. 4 - Validación y calibración de los modelos, y formulación termo-acoplada del método de los elementos discretos y 5 - Simulaciones de las pruebas de campo.

En la Figura 54 se observa el equipamiento de laboratorio, que cuenta con las prestaciones técnicas necesarias en cuanto a: fuerza, velocidad y tiempo de duración del ensayo de desgaste y control en tiempo real de las diferentes variables de respuesta (temperatura, pérdida de masa, etc.). En esta misma, se observa, el proceso de simulación de este ensayo experimental. En este caso, el movimiento no lo ejecuta la herramienta de corte, sino una roca de forma circular que representa el terreno y con una cámara infrarroja se contralaba en tiempo real la variación de las temperaturas.

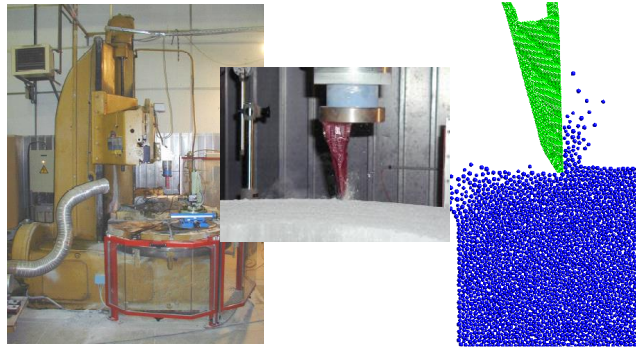


Figura 54. A la izquierda, equipo de ensayo de desgaste con altas prestaciones de fuerza y velocidad. A la derecha, ilustración de la simulación numérica con DEM.

En las Figura se observa, la correspondencia de los resultados de la simulación, con los obtenidos en pruebas de campo, en diferentes tipos de terreno. Este resultado numérico y su correspondencia con resultados experimentales muestran la fiabilidad de la formulación del MED, incluyendo su implementación computacional.

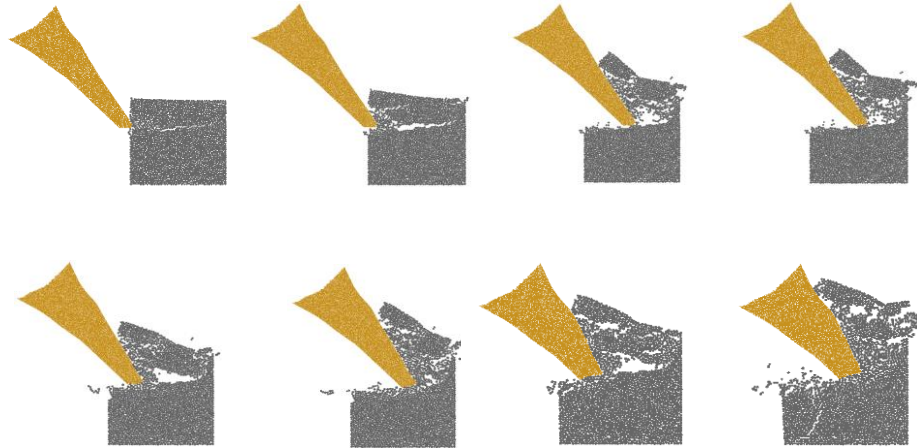


Figura 55. Proceso simulación numérica de una excavación, en distintos estadios del proceso de desgaste.

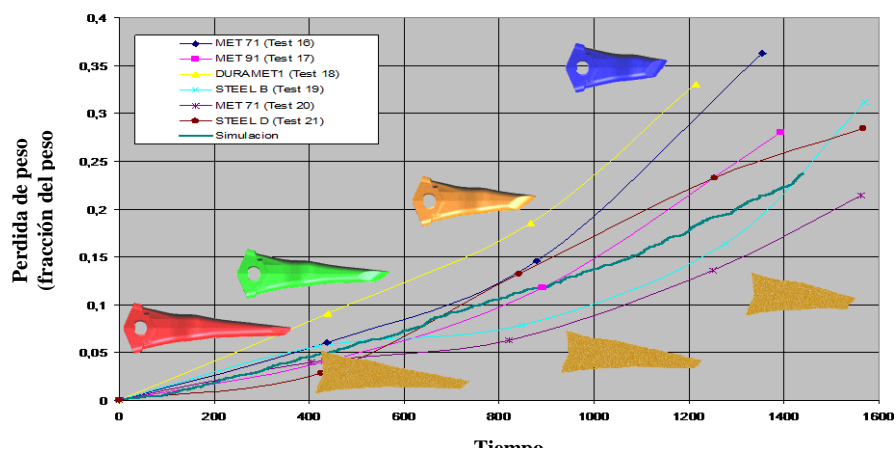


Figura 56. Comparación de la curva de pérdida de masa vs tiempo, hallada mediante la simulación con los ensayos reales y la representación del cambio de geometría del diente debido al desgaste.

Los resultados de las simulaciones numéricas con el método de los elementos discretos que se ilustran en las Figuras 54, 55 y, 56 son simulaciones numéricas que forman parte de esta propuesta de premio (Anexo V y VI).



Las simulaciones de desgaste en 2D, posibilitan estudiar este fenómeno, pero no permiten realizar análisis de la influencia del desgaste en la geometría de las herramientas de corte; y mucho menos análisis de optimización de la forma y dimensiones de estas herramientas. Esto hace que para ciertas investigaciones sea necesario realizar simulaciones en 3D, a pesar del elevado costo computacional de las mismas.

Con el objetivo de ilustrar las potencialidades de la formulación realizada y la eficiencia de su implementación computacional, se han realizado varias modelaciones en 3D del fenómeno de desgaste. Las peculiaridades de las simulaciones de desgaste en 3D son las mismas que las de 2D, pero con la diferencia de que se trabaja con una dimensión más. El modelo de elementos discretos creado para este estudio se representa en la Figura 57.

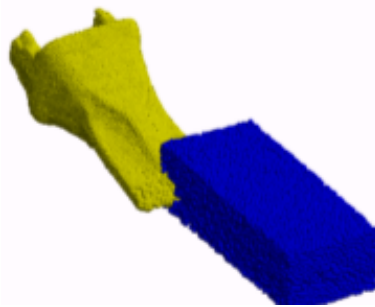


Figura 57. Modelo de elementos discretos en 3D para el estudio del desgaste.

En este estudio, se ha simulado el fenómeno del desgaste de un mismo tipo de diente (MR-45) en diferentes terrenos. Los resultados del cambio de configuración geométrica del diente MR-45 producto del efecto de interacción terreno-herramienta, se representan en las Figura 58-60. En dicha figuras (Figura 58-60), aparece una vista lateral y superior del diente MR-45 en diferentes intervalos de tiempo de la simulación, y se observa cómo varía el desgaste en función del tipo de terreno.

En las Figura se aprecia el cambio de la geometría del diente cuando interactúa con el terreno (terrenos A, B y C) en dos pasos de tiempo. Es apreciable cómo el proceso de desgaste, primeramente se acentúa en los extremos de la herramienta de corte, y después se genera en la parte central del implemento. Estudios de este tipo posibilitan realizar análisis de configuración geométrica de diferentes herramientas de corte y además, permiten realizar optimizaciones de la geometría y forma de las mismas. Este tipo de estudio puede estar dirigido a la búsqueda de nuevas formas geométricas de herramientas de corte, que sean resistentes al fenómeno del desgaste. De este modo, se pueden obtener configuraciones geométricas que prorroguen la vida útil de las herramientas de corte que se emplean en las diferentes maquinarias de excavación o de otra índole.

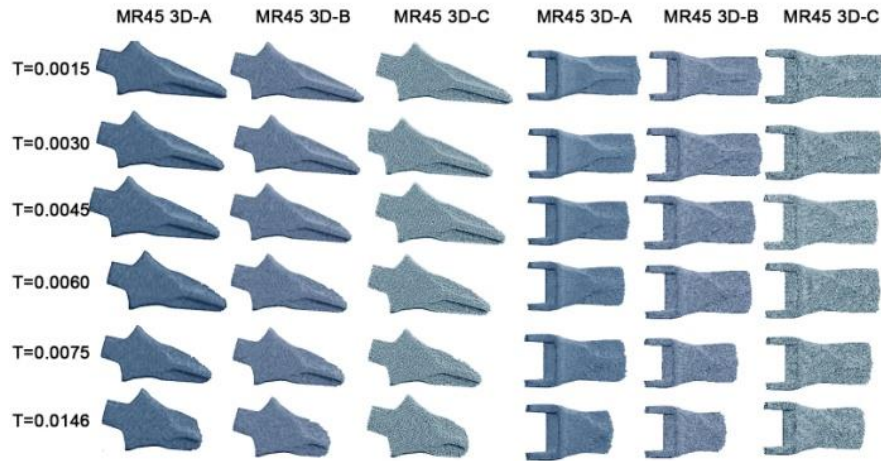


Figura 58. Estudio del fenómeno de desgaste en 3D en diferentes tipos de terreno.

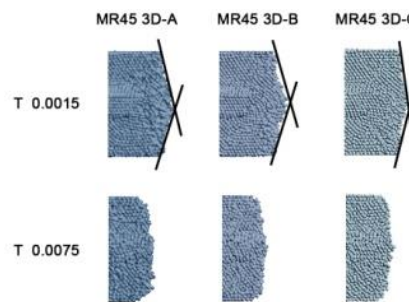


Figura 59. Evolución del fenómeno de desgaste en estadios de tiempo diferentes en distintos tipos de terreno.

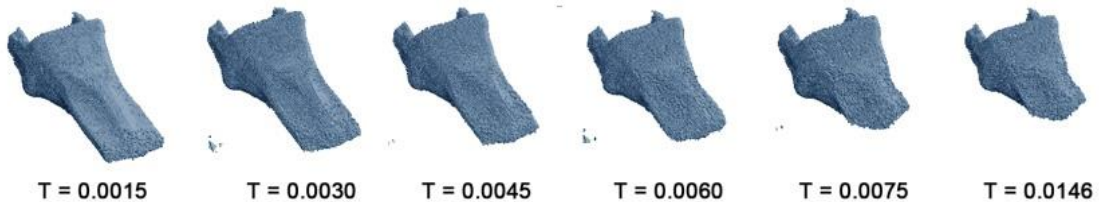


Figura 60. Representación en 3D de la evolución del desgaste de la herramienta de corte cuando interactúa con el terreno.

Como parte del proyecto CUTTER también se hicieron simulaciones del funcionamiento de dragas (Figura 62-65). En este sentido hubo que simplificar el funcionamiento de la misma a un solo diente buscando el esquema de funcionamiento individual de un diente de la mima (Figura 62). Las simulaciones numéricas se efectuaron con varias alternativas: método de los elementos discretos (DEM) y acoplamiento de método de elementos finitos con este (DEM). Las simulaciones con ambas alternativas se ilustran en la Figura 63. La simulación numérica, donde se efectúa una modelación termo-mecánica acoplada para el estudio de fenómeno de interacción terreno-herramienta de corte y desgaste de la misma se evidencia en las Figuras 64 y 65. En estas simulaciones numéricas para obtener los resultados alcanzados se emplean los métodos numéricos que forman parte de esta propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba.



Figura 61: Cabeza de corte de la Draga. Dientes de la Draga originales y desgastados

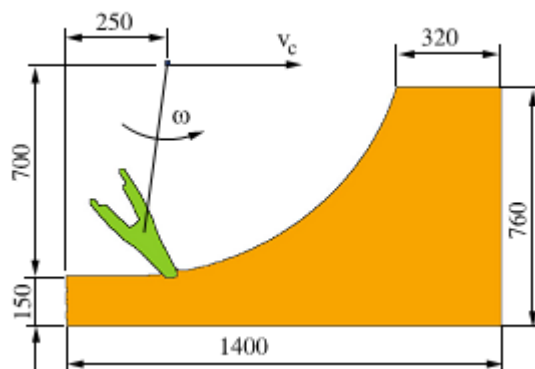
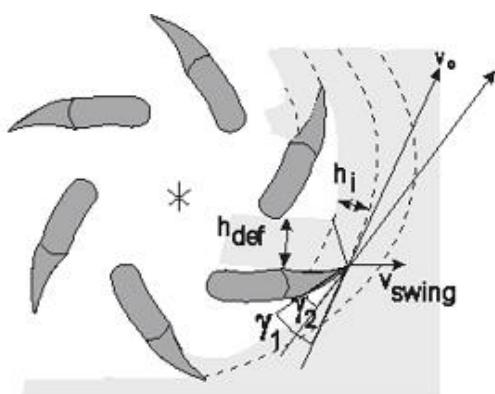


Figura 62: Esquema de trabajo de un diete de la Draga y Modelo geométrico para la Simulación

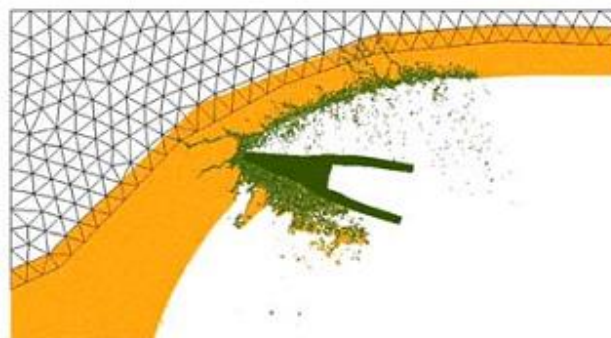
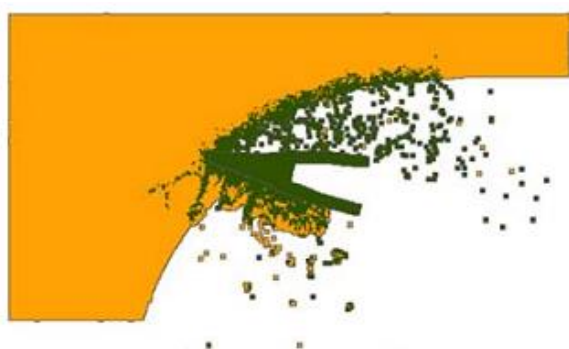


Figura 63. Simulación de excavación de la Draga con DEM y DEM/FEM y MEF acoplado.

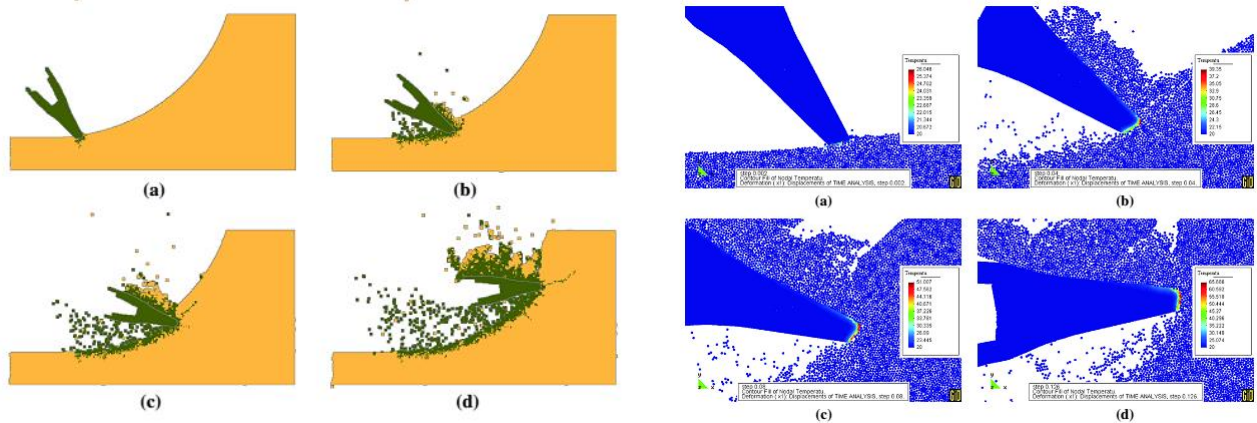


Figura 64. Simulación termo-mecánica acoplada de proceso de corte de una draga en diferentes intervalos de tiempo.

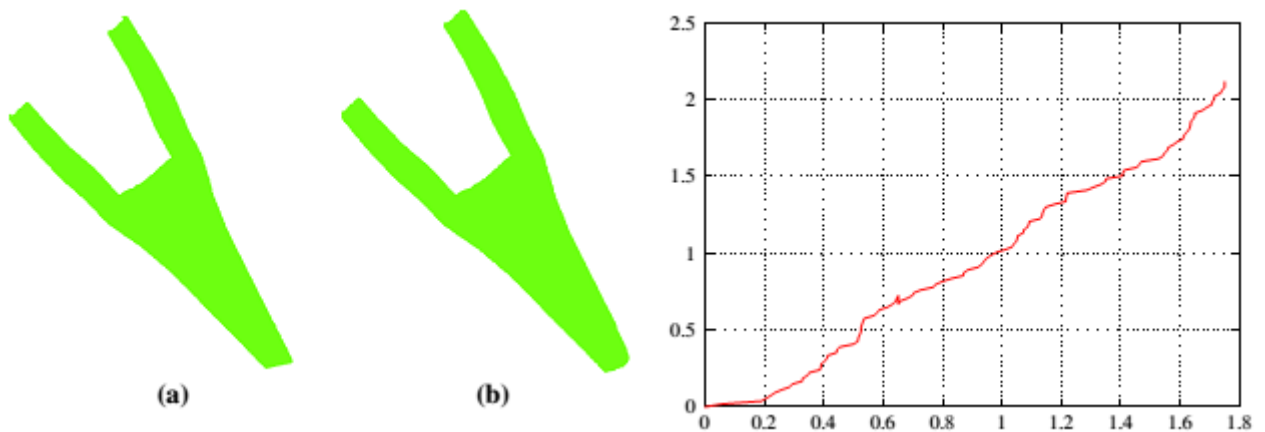


Figura 65. Diente de la Draga original de desgastado después de un tiempo de régimen de trabajo. Grafica de pérdida de masa en % (eje y) vs Tiempo de régimen de trabajo (eje x).

Los proyectos PARAMIX I y II son proyectos financiados, por la Comisión Europea, por el Programa GROWTH (Anexo VI). En estos dos proyectos se estudian problemas de interacción terreno-vía ante el efecto de cargas estáticas y dinámicas por diferentes métodos numéricos, incluidos los métodos de partículas (incluido el DEM). En este caso de estudio de problemas de interacción neumático terreno, se emplea el método de los elementos discretos (Figura 66).

Estos tipos de simulaciones (Figura 66) fueron necesarias desarrollarse en los proyectos PARAMIX I, PARAMIX I y CAPES/MES 200/13 (Anexo VI) y evidencia el uso de estas tecnologías de partículas en el estudio de problemas de ingeniería vial. En los proyecto PARAMIX I y II, se emplean las tecnologías de avanzada de modelación con partículas y el método de los elementos finitos que es un método más establecido. El proyecto CAPES/MES 200/13 es un proyecto de investigación aplicada del métodos de partículas y otros métodos numéricos más establecidos a problemas de interacción terreno-vía-neumático. En él se emplean las técnicas numéricas que se presentan en esta propuesta de premio y además se hace uso del método de los elementos finitos efectuándose un análisis comparativo entre las dos formulaciones. En la actualidad este es un proyecto que está en funcionamiento.





Figura 66. Ilustración del uso de los métodos de partículas (método de elementos discretos) para modelación de problemas de ingeniería vial y donde se hace uso de las técnicas de generación y empaquetamiento de partículas para disponer de la malla inicial.

El proyecto TUNCONSTRUCT y el proyecto Ciudad Multidimensional fueron dos Proyectos financiados por la Comunidad Europea y el Ministerio de Educación y Ciencia de España (Anexo VI) y donde se hicieron uso de las técnicas de simulación con partículas (DEM). Estos son proyectos, donde las tecnologías de avanzada de modelación con partículas se usaron para modelar problemas de simulación del proceso de construcción y explotación de obras de ingeniería como: túneles y obras subterráneas. En el caso del proyecto Ciudad Multidimensional, tuvo la peculiaridad de que las tecnologías de avanzada de modelación con partículas se usaron para modelar problemas de simulación de obras subterráneas como túneles en fase de construcción y explotación. En ambos proyectos (Figuras 69 y 70), fue necesario hacer un intensivo de las técnicas de modelación con partículas, para poder disponer de los modelos numéricos y efectuar las simulaciones que se ejecutaron en los mismos.



Figura 67. Máquina de Perforación de Túneles TBM y Disco de Corte de la TBM

En la Figura 67 se ilustran las máquinas (TBM) que se emplean para la construcción de túneles y obras subterráneas. De igual manera se muestran algunos ensayos a escala (Figura 68) de los discos de corte de las TBM, que fueron los que se utilizaron para estudiar el fenómeno de excavación. En la Figura



69 y 70, se evidencia las simulaciones numéricas de la perforación de una obra subterránea con una TBM y la simulación a escala reducida de corte lineal de disco individual de la TBM.



Figura 68. Ensayo a escala de un disco de corte de la TMB



Figura 69. Simulación de una perforación de túnel con un maquina TBM

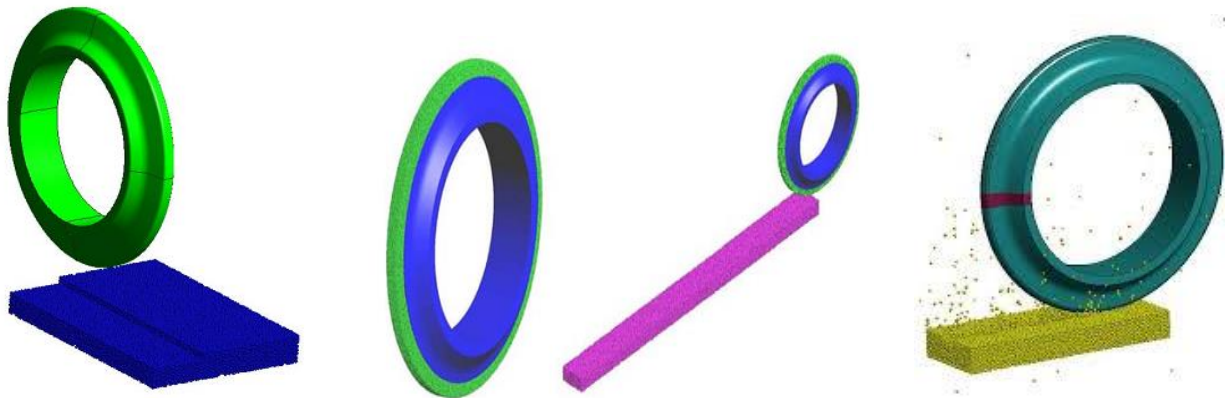


Figura 70. Simulación con partículas de corte lineal en un ensayo a escala de disco de la TBM.

En el proyecto VLIR “Desarrollo de Técnicas Computacionales de Avanzada” (Anexo VI), se continuaron desarrollando las tecnologías de avanzada de modelación con partículas y su aplicación a problemas de bioingeniería y otras aplicaciones ingenieriles, como es el caso de la ingeniería ferroviaria (Figuras 90-92). Los estudios de problemas de biomecánica y otras aplicaciones, se continuaron desarrollando con el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería con los grupos de Biomecánica, Geomecánica y Mecánica Estructural. De modo análogo, se ha mantenido una

cooperación estable con el Departamento de Ciencia de la Computación y Departamento de Biosistemas de la Universidad de KU Leuven (Anexo VI). Trabajos paralelos se continuaron realizando con la UnB en el área de Geomecánica e Ingeniería del Petróleo.

En algunas investigaciones que se han acometido, se han utilizado las técnicas desarrolladas en esta propuesta de premio, para la modelación de tejido óseo (Anexo IV, V y VI). Estas técnicas de simulación biomecánicas se emplean para el desarrollo de algunas tecnologías de implantes, entre otras utilidades. A continuación se evidencia varias aplicaciones de la tecnología desarrolladas al caso de varios componentes óseos del cuerpo humano. Un ejemplo de lo expresado se ilustra en la Figura 71, donde se evidencia un cráneo humano, que se sometió posteriormente a una simulación de impacto efectuada con el DEM. En la Figura 72 se ilustran los resultados de la modelación geométrica virtual de tejido óseo de una cadera humana, la cual se obtuvo para realizar simulaciones de desgaste en su interacción con el fémur. Estas simulaciones de desgaste se efectuaron con el DEM. Por su parte en la Figura 73 se muestra la modelación virtual de una vértebra del tejido óseo humano. Estas modelaciones geométricas virtuales se empleó para efectuar simulaciones numéricas de problemas de biomecánica y para el desarrollo de implantes médicos. En la Figura 74 a modo ilustrativo se observa la modelación virtual de un tejido óseo cortical.

Los ejemplos mostrados en las Figuras 71-74 evidencia el uso de las tecnologías de modelación con partículas al campo de la biomecánica y la bioingeniería que son disciplinas, de alto nivel de impacto en el desarrollo científico.

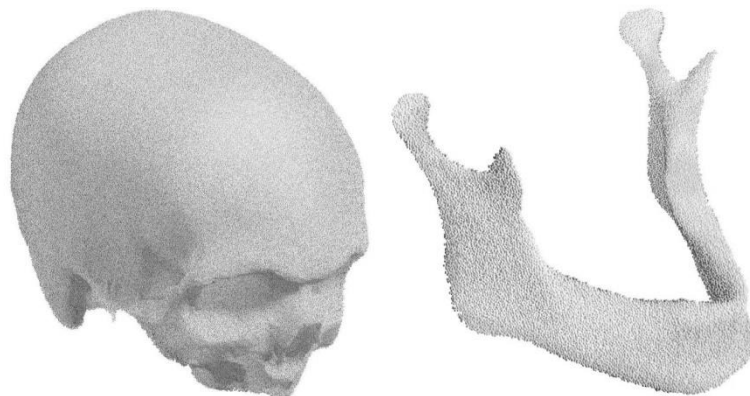


Figura 71. Mallas de tejido óseo con un alto nivel de complejidad geométrica. Se ilustra cráneo humano, y la mandíbula correspondiente a este cráneo.



Figura 72. Malla de tejido óseo con alto grado de complejidad. Se ilustra una cadera humana.



Figura 73: Modelación virtual de una vértebra de tejido óseo humano.

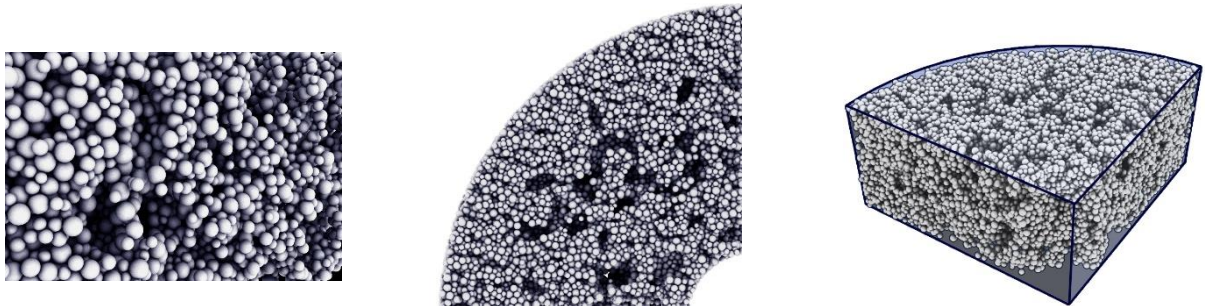


Figura 74. Representación de tejido trabecular obtenido virtualmente con las técnicas desarrolladas.

El proyecto de desarrollo de técnicas de modelación numérica de problemas complejos de ingeniería del petróleo, que se desarrolla con la Universidad de Brasilia (UnB, Brasil), como un proyecto de investigación básica, se emplean las técnicas de modelación con partículas (MPM, SPH y DEM) para la simulación de perforaciones de pozos de petróleo y estudios de fracturamiento hidráulico (Figura 75). En el mismo se aplican los métodos de partículas –DEM– (Figura 78), con las formulaciones desarrolladas, que son propuestas de este premio de la Academia de Ciencias de Cuba. En la Figura 76 se ilustra un laboratorio de perforación y las brocas del taladro de perforación, que se usan habitualmente para estos tipos de trabajo. En otra figura (Figura 77) se observa la cabeza del taladro y la broca. Por su parte en la Figura 78 se evidencia a modo de ilustración una simulación numérica preliminar con método de partículas (DEM) del proceso de perforación de petróleo.



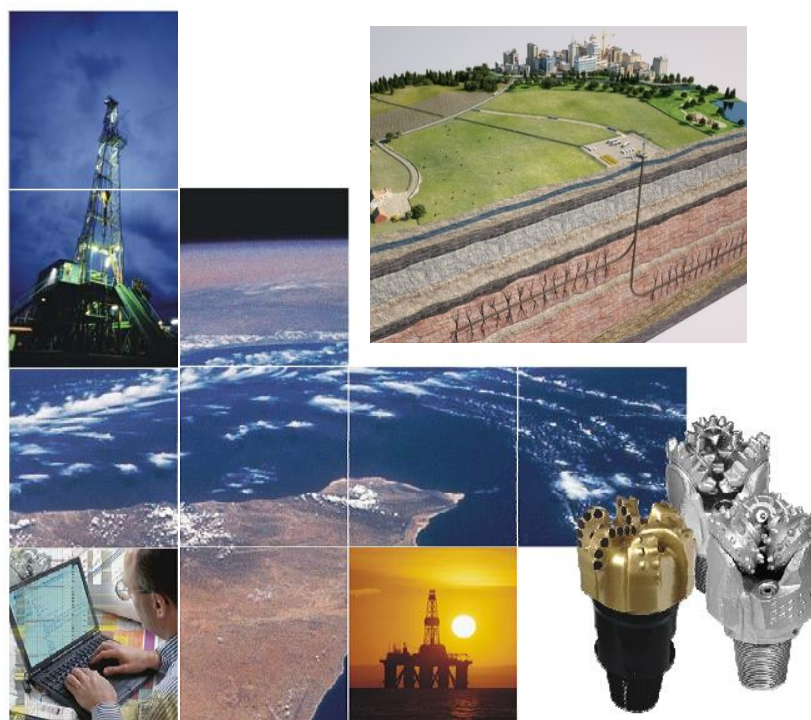


Figura 75. Empleo de las técnicas de simulación numérica en ingeniería del petróleo.



Figura 76. Laboratorio de perforación y Broca del taladro de perforación



Figura 77. Taladro de perforación y brocas

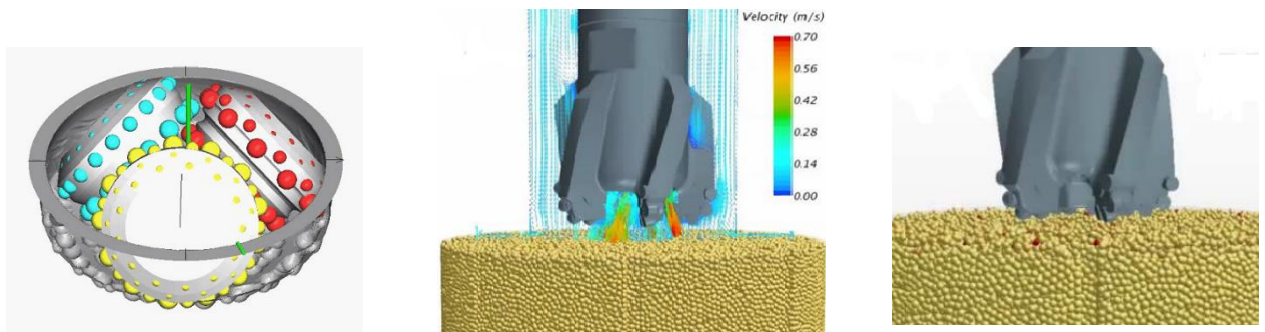


Figura 78. Modelo de la broca de taladro y simulación de perforación.

El proyecto “Estudio sistémico e integrador (modelación –experimentación) de la penetración de iones cloruros en la masa de hormigón, es un proyecto de investigación básica y aplicada, donde se desarrollan y aplican las tecnologías de avanzada de modelación con partículas al estudio de la penetración de los iones cloruros en la masa de hormigón. En el mismo se aplican las tecnologías de partículas, para obtener la estructura de este material a escala micro y la simulación de este fenómeno en la masa de hormigón. Disponiendo de la geometría virtual que describe la red de poros a este modelo geométrico se le aplica un modelo difusivo, para modelar la penetración de los iones cloruros en la masa de hormigón a escala micro de la mecánica computacional.



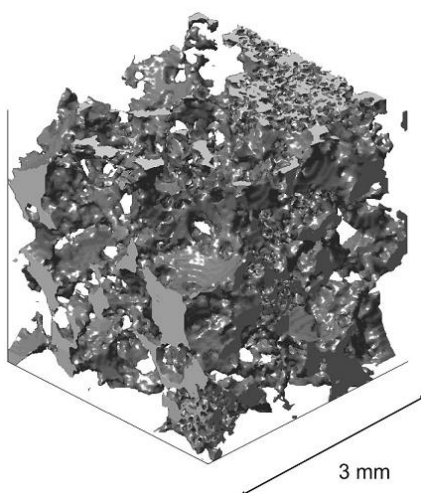


Figura 79. Obtención de la red de poros.

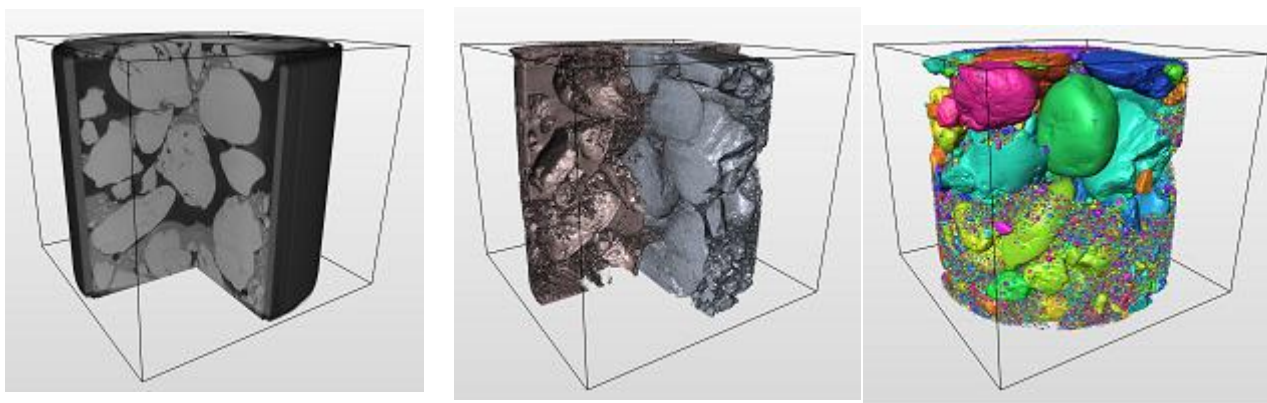


Figura 80. Imagen en 3D de la muestra de hormigón. Levantamiento en 3D de la red de poros e identificación de las partículas por colores.

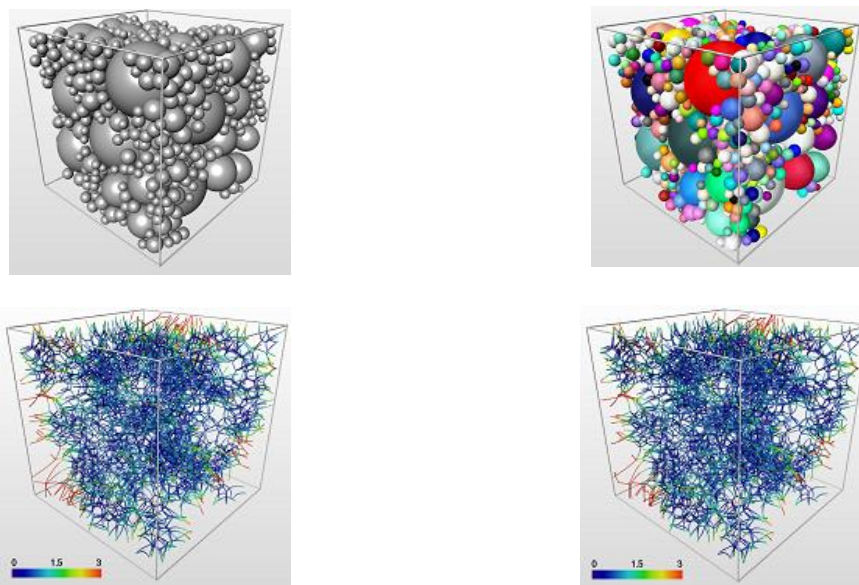


Figura 81. Empaquetamiento de partículas, identificación de partículas por colores, diagrama de Voronoi y red de poros con la información.

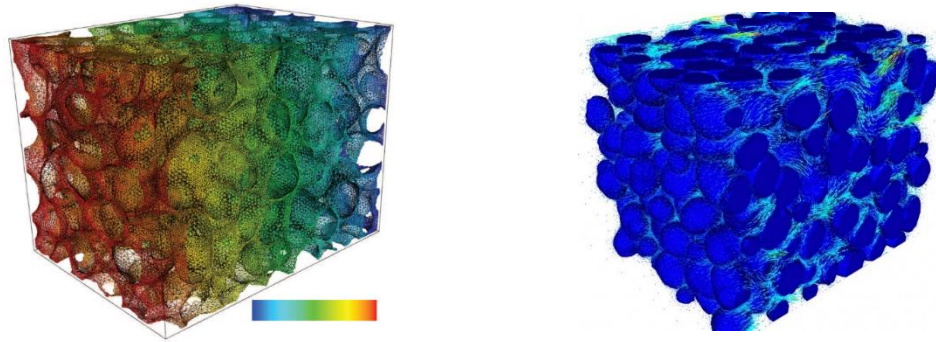


Figura 82. Mallado con elementos finitos de la red de poros y resultados del modelo numérico.

Los resultados que se evidencian en las Figuras 79-82 es otra las de las aplicaciones que tienen los métodos de partículas (DEM) y que forman parte de las actividades de los diferentes proyectos que se ejecutan (Anexo VI). Estos resultados son muy preliminares ya que el proyecto está en fase de desarrollo.

Uno de los proyectos de la Tarea Triunfo es un proyecto que desarrolla técnicas de modelación numéricas de partículas, para estudiar fenómenos de balística de efecto y blindaje. En este proyectos se han desarrollado y aplicado las tecnologías de partículas para la modelación de las diferentes capas del blindaje. Con esta misma finalidad se ha modelado virtualmente estructuras policristalinas de aceros ante el efecto del impacto de proyectiles, que es otro elemento componente del blindaje. Los resultados científicos, que se reportan como parte del premio de la Academia de Ciencias de Cuba se están aplicando en las actividades del proyecto y se está efectuando la modelación de problemas de balística de efecto y blindaje con técnicas de modelación micro para el estudio de blindajes.

La modelación de impacto de proyectiles, es una de las tareas del proyecto, que desarrollar técnicas de modelación numéricas de partículas para estudiar fenómenos de balística de efecto y blindaje. En las Figuras 83-86, se ilustran diferentes simulaciones de impacto de proyectiles sobre estructuras de blindajes. Estas aplicaciones están en fase de desarrollo para el proyecto Tarea Triunfo. Los resultados que se ilustran son preliminares.

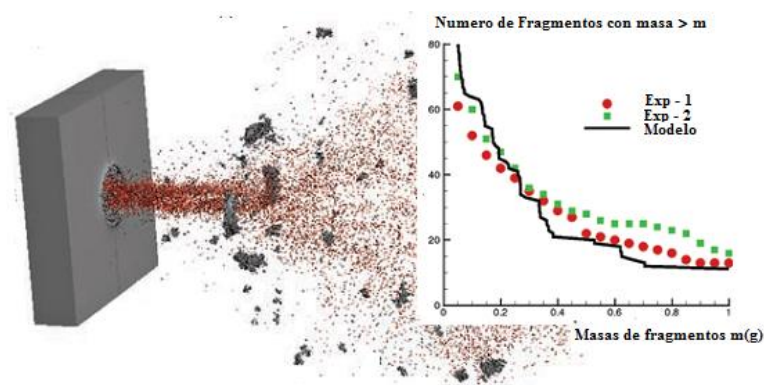


Figura 83. Simulación numérica del fenómeno de balística de efecto y blindaje.

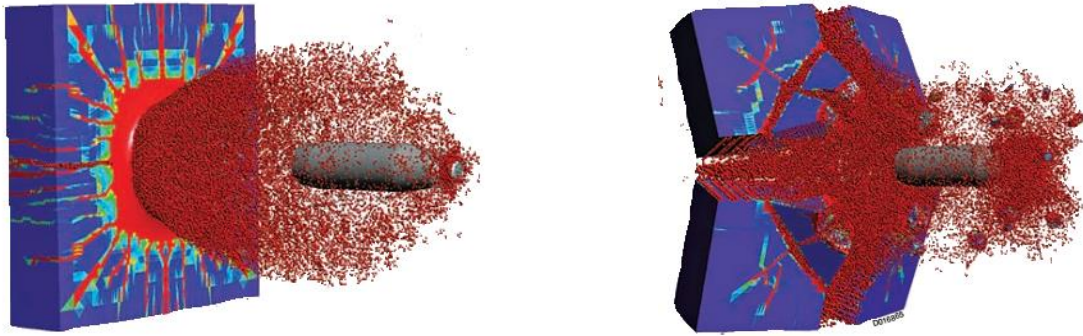


Figura 84. Diferentes estadios del impacto de un proyectil sobre una estructura de blindaje.

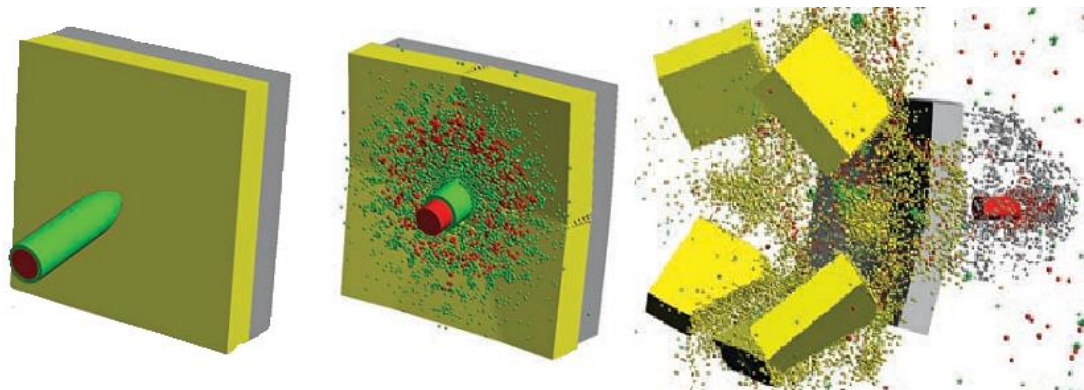


Figura 85. Simulación numérica del impacto de un proyectil sobre un blindaje bicapa

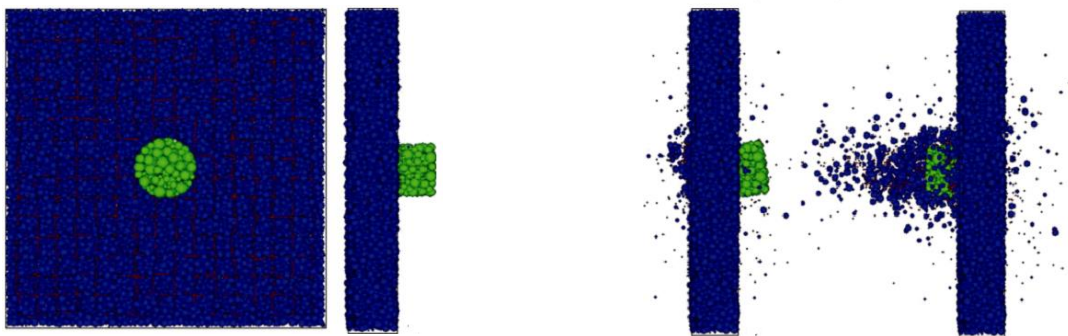


Figura 86. Simulación numérica del impacto de un proyectil sobre un blindaje reforzado con fibras.

El proyecto “Desarrollo de tecnologías de avanzada de modelación con partículas” que financia CAPES/Brasil, es un proyecto de investigación básica, que es homólogo del proyecto nacional de modelación micro y los proyectos de cooperación que se disponen con Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería. Este es un proyecto de investigación se centra en el estudio de problemas geotécnicos y de materiales como asfaltos. Este proyecto se realiza de conjunto con la Universidad de Brasilia, el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría y la Universidad Central de Las Villas.

En este proyecto se están haciendo uso de los medios topográficos existentes en varias instituciones brasileñas, incluida la Universidad de Brasilia. En los estudios efectuados hasta el momento, se han efectuado levantamientos en 3D de diferentes materiales (artificiales y naturales). Los materiales artificiales con los que se han trabajado son: esferas de vidrios y los naturales han sido: arenas, arcillas y asfaltos.



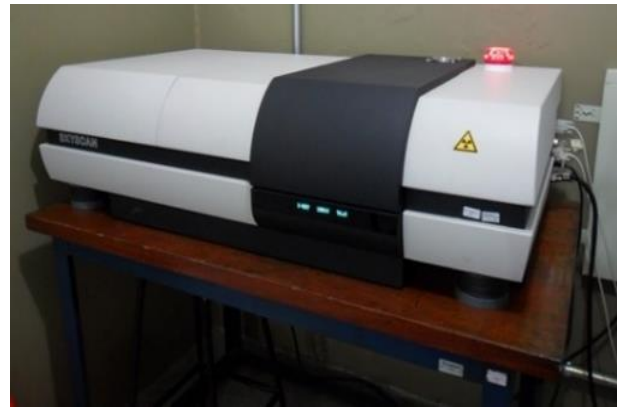


Figura 87. Equipos de Tomografía.

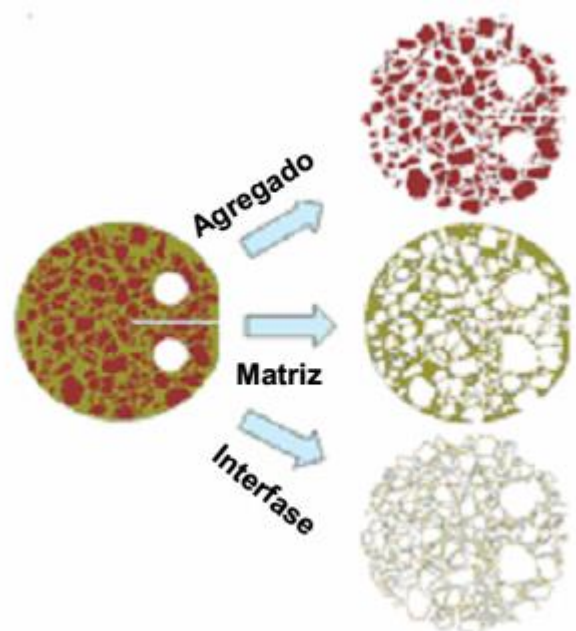


Figura 88. Imágenes de asfalto obtenidas con el tomógrafo

En este proyecto CAPES-MES 208/13 que se ejecuta en este momento con la Universidad de Brasilia se desarrollan varias investigaciones de carácter experimental y otros numéricas. Las aplicaciones van dirigidas a problemas geomecánicos y de ingeniería vial. La escala de modelación es la escala micro de la mecánica computacional. Como parte de las actividades de dicho proyecto se han desarrollado varias tesis de grado, maestría y doctorado (Anexo V). Se disponen de resultados muy avanzados (resultados reportados en las diferentes tesis – Anexo V-) desde el punto de vista teórico y se comienzan a hacer las primeras aplicaciones prácticas reales (Figura 89). Los proyectos SimPhoNy, VOLADAPT y PARTING son otros proyectos internacionales que son homólogos de este proyecto y que se realizan con el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE). El proyecto nacional homólogo de todos estos proyectos internacionales (CAPE/MES, SimPhoNy, VOLADAPT y PARTING) es el proyecto modelación micro (9169) – Anexo VI.



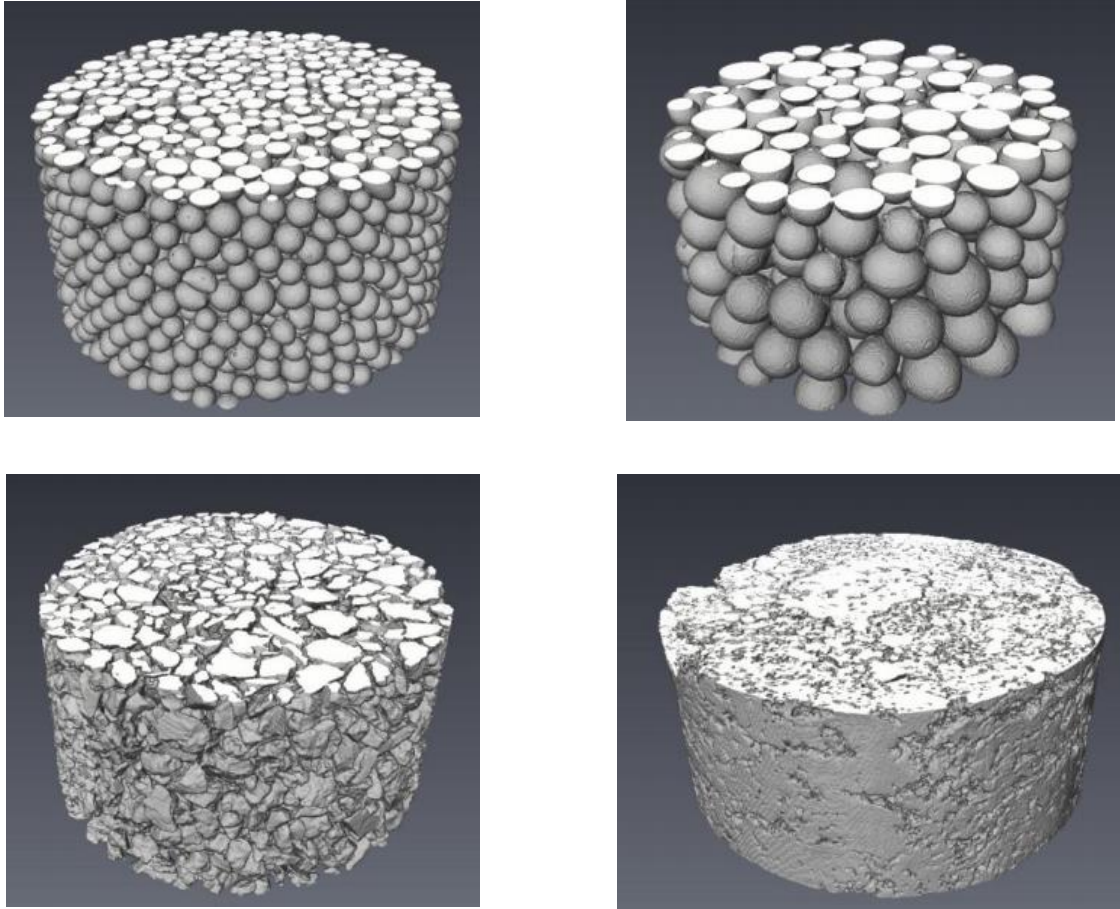


Figura 89. Levantamiento tomográfico de muestras de esferas de vidrio (0.5 mm y 1 mm), arena y arcillas.

El proyecto de “Desarrollo e implementación de tecnologías de avanzada para la modernización y automatización del sistema de inventario, diagnóstico, evaluación, mantenimiento y conservación de puentes de ferrocarriles”, es un proyecto que responde a intereses del Ministerio del Transporte (MITRANS). Los proyectos MONICAB y BALAMED son otros proyectos internacionales homólogos de este. En el mismo se hace uso de las tecnologías de modelación con partículas para modelar el efecto de interacción suelo, balasto, estructura de la vía ferroviaria (Instalación fija: traviesa, fijaciones y rail) a escala macro. En este caso lo que se modela con partículas es la Balasto donde se apoya la instalación fija (traviesa, fijaciones y rail). El suelo se modela como medio continuo deformable o rígido.

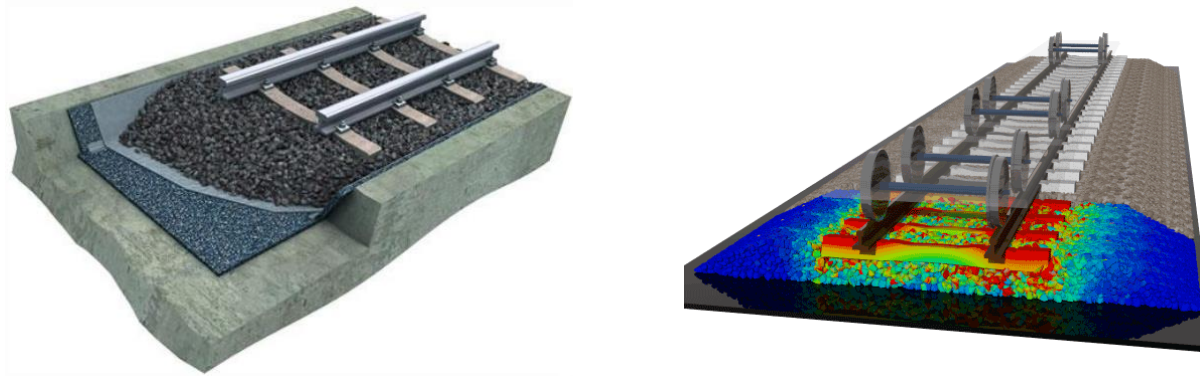


Figura 90. Estructuras real y modelo numérico. Instalación fija (traviesa, rail) y interactuando con el balasto.

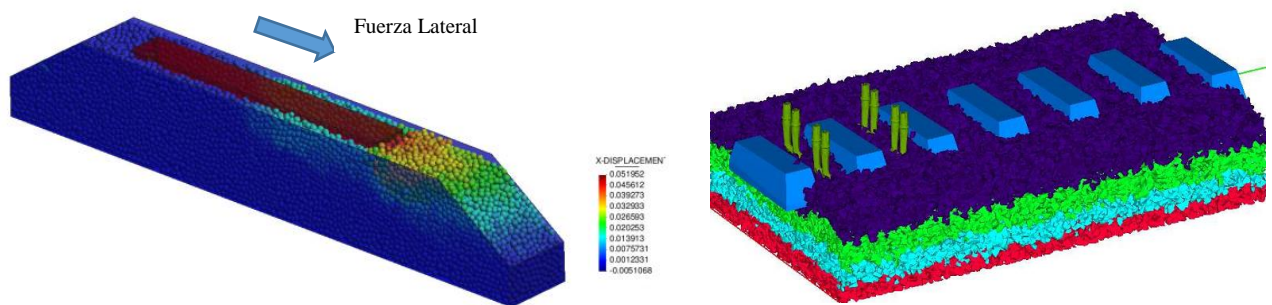


Figura 91. Modelación de una traviesa sometida a carga lateral y modelo en 3D del sistema de colocación de las traviesas.

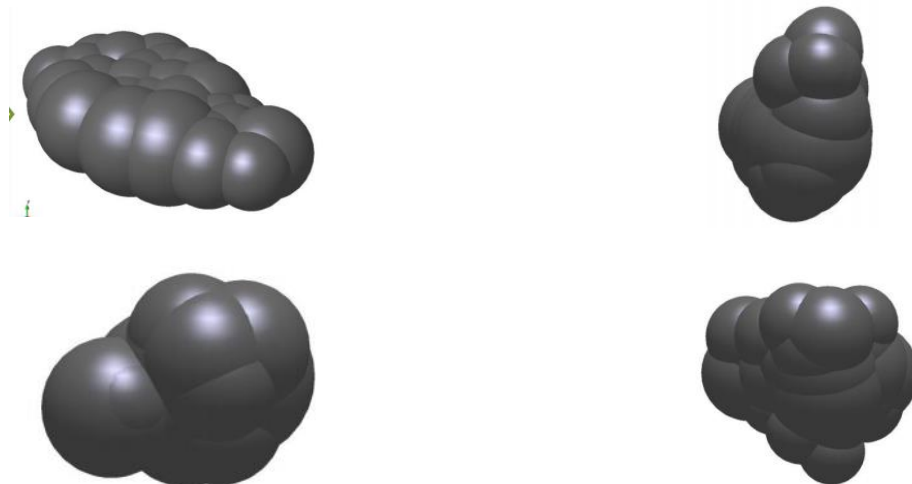


Figura 92. Algunos ejemplos ilustrativos de clúster de esfera que describen la forma irregular del Balasto y que son empleados en los modelos numéricos del método de elementos discretos.

En las figuras 90 y 91 se ilustra el uso del método de los elementos discretos para el análisis de problemas de interacción instalación fija balasto considerando el suelo como un material rígido. Estas simulaciones forman parte de varios proyectos nacionales e internacionales (Anexo VI). Estas técnicas de modelación con partículas (DEM) se emplean clúster de partículas esféricas (Figura 92) que describen la forma irregular de balasto cuya forma es obtenida a través de descriptores de Fourier.

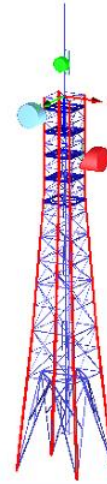


Figura 93. Antenas de transmisión y modelación numéricas de las antenas.

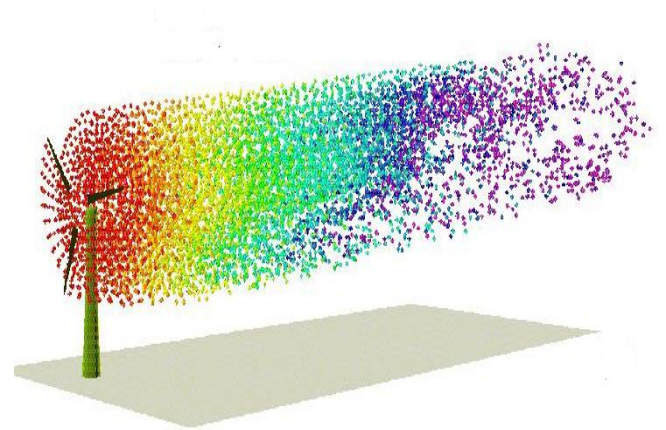


Figura 94. Aerogenerador y Modelación numérica CDF de un aerogenerador con métodos de partículas (modelación preliminar).

El proyecto VLIR/RIP denominado VIBRAS, que recién comienza sus acciones de investigación, se centra en el uso de varias tecnologías numéricas en el análisis de estructuras ante acciones dinámicas. Unas de las tecnologías que se usan en este proyecto, son las tecnologías desarrolladas para métodos de partículas y los métodos convencionales, las cuales se utilizarán para el análisis dinámico (Figura 93 y 94), tanto en análisis estructurales, como de interacción suelo-estructura (Figura 95). Este proyecto se hace de conjunto entre varias universidades cubanas (UCLV y ISPJAE), con la Universidad KU Leuven, Bélgica. Otros proyecto que recién comienza es el proyecto de modelación matemática y computacional de los sistemas eólicos e hidroeléctricos con evaluación de la durabilidad por modelos de vida útil”. Este proyecto está financiado por CNPq y participan la empresa *FURNAS Centrais Elétricas S.A.* de Brasil y la Universidad de Brasilia entre otras universidades de este país. En dicho proyecto se pretende utilizar los métodos de partículas y métodos convencionales, para estudiar fenómenos el efecto de interacción fluido-estructura (Figura 94) y de interacción suelo estructura (Figura 95). En ambos proyectos será necesario hacer uso de las técnicas de avanzada que forman parte de esta propuesta de premio.



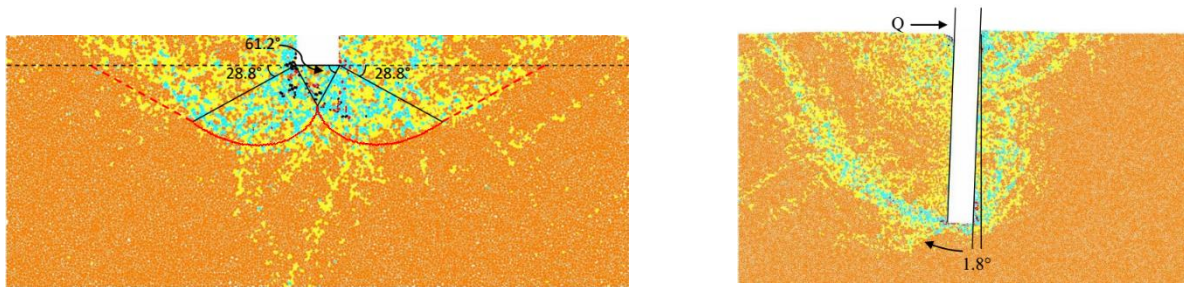


Figura 95. Modelación de problemas de interacción suelo-estructura con métodos de partículas.

Los resultados mostrados (Figura 43-95) forman parte de las diferentes tesis de grado, maestría y doctorado (Anexo V) que integran la propuesta de premio de la Academia de Ciencias de Cuba. Una explicación detallada de los estudios realizados en cada caso, se encuentra en los informes técnicos parciales y finales de cada uno de los proyectos, donde se aplicaron las técnicas numéricas de modelación con DEM (Anexo VI).

Los aspectos más relevantes de estas investigaciones (1 - Formulación genérica de DEM para resolver problemas de multifísica y multiescala, como por ejemplo solución de problemas termo-mecánico acoplado incluido la simulación de desgaste, 2 - Formulación varios modelos constitutivos de contacto y la estimación de parámetros de los mismos, incluidos la relación con los parámetros constitutivos macro convencionales, 3 - Acoplamiento del DEM con otros métodos, lo cual mejora el rendimiento y costo computacional de las simulaciones) forman parte de las publicaciones de alto nivel realizadas (Anexo IV). Como aspectos más relevantes se reportan publicaciones en las revistas: *Interaction and Multiscale Mechanics: An International Journal*, *Acta Geotechnica*, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería*, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, *Canadian Geotechnical Journal*, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, *International Journal of Solids and Structures*, *Computational Mechanics*, *Computational Particle Mechanics*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *Computers and Electronics in Agriculture*, *DYNA*, *Geotechnical Testing Journal*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, *Computers and Geotechn.*, que son revistas de alto índice de impacto. De igual modo se ha publicado los resultados en las memorias de congresos reconocido prestigio internacional (Anexo VI).





## Conclusiones.

El trabajo científico desarrollado, que se propone a Premio Nacional de la Académica de Ciencias de Cuba, tiene múltiples aportes al campo de la ciencia. Estos aportes en algunos casos, son temas de investigación que rozan con los límites de conocimiento humano en estas temáticas (micro-modelación, bio-modelación y en caso puntuales nano-modelación) y en los cuales, se han efectuado aportes científicos originales y novedosos.

Este trabajo científico es el resultado de la cooperación científico-técnica de un colectivo de autores de varias instituciones académicas, productivas y de investigación, tanto de Cuba, como del extranjero, que durante varios años (más de 10 años), han realizado aportaciones relevantes al campo de la ciencia (macro-modelación, micro-modelación, bio-modelación y nano modelación en el caso específico de mejora de materiales con nano partículas con micro-modelación), que se relaciona con la mecánica computacional y los métodos numéricos en la ingeniería.

Los principales aportes del trabajo se centran en el desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación con métodos de partículas y los aspectos más significativos son:

### MPM

1. 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.
2. Formulación de modelos constitutivos (macroestructurales) elasto-plásticos 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.
3. Validación de las implementaciones numérica y computacional realizadas al método MPM enfocado a la resolución de problemas geotécnicos y geomecánicos.
4. 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

5. Formulación del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para el caso de 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. El método SPH se concibió inicialmente para resolver problemas de fluido.
6. Formulación multi-física (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).
7. 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).
8. Implementación computacional y paralelización del método SPH en su concepción para mecánica de sólidos (geomecánica y geotecnia) y problemas acoplados (fluido-sólido).



9. Formulación de modelos constitutivos macroestructurales elasto-plásticos 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).
10. Validación de las implementaciones computacionales realizadas en el método SPH.
11. 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.)

#### **DEM**

12. Formulación genérica (multiescala) del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas en diversas escalas de la mecánica computacional.
13. Formulación multi-física del método de los elementos discretos (DEM) para enfrentar problemas acoplados: termo-mecánico acoplados incluido 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.
14. 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).
15. Se efectúa 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.
16. 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.
17. 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 estos aspectos limitan el uso del método de los elementos discretos (DEM).
18. 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.)

**Nota aclaratoria:** En el caso del método de los elementos discretos (DEM) no se incluyen los aportes realizados en los temas de: 1 - Generación de partículas, 2 - Evaluación de la calidad de las mallas de partículas, 3 – Generación geométrica de estructuras micro de materiales, ya que estos trabajos recibieron en el 2016 el premio Anual de la Academia de Ciencias.

En la investigación presentada, sus aplicaciones están directamente relacionadas con los diferentes proyectos que investigan, donde se han aplicado los diferentes resultados científicos. Estos proyectos, presentan diferentes categorías y los mismos, se han desarrollado en colaboración con las instituciones que forman parte de esta propuesta de premio: 4 Proyectos internacionales de cooperación científica con una institución de elite mundial (Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería - CIMNE - ) en la temática de métodos numéricos, 4 Proyectos nacionales en ejecución, 9 Proyectos internacionales concluidos, 7 Proyectos internacionales en ejecución, 9 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 UnB-CUJAE-UCLV y UCLV-CIMNE, se incluyen en los mismos los investigadores de Cuba. Como parte de las acciones de estos proyectos, los desarrollos establecidos en esta investigación han sido aplicados a la resolución de diversos problemas de ingeniería. En el trabajo se reportan como aspecto significativo 37 publicaciones en revista del Grupo



I y 17 publicaciones en otros tipos de revistas. Además, se han publicado en memorias de congresos de relevancia internacional 58 publicaciones. Colateralmente en congresos internacionales en Cuba se ha reportado 18 publicaciones. Adicionalmente se han efectuado 3 monografías y 2 reportes técnicos, a lo que se le une todos los reportes de proyectos nacionales e internacionales elaborados. Como parte del trabajo se ha desarrollado diversas investigaciones científicas que han culminado con 17 trabajos de diploma, 13 Tesis de Maestría y 12 Tesis doctorales, aspecto que denota el elevado nivel de trabajo realizado. El trabajo presenta conexiones de trabajo conjunto de varias universidades del país, empresas cubanas y de otras entidades académicas y científicas internacionales de renombre internacional.

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, MPM y DEM). Estos resultados le han permitido a Cuba estar representado como miembro de comité científico del congreso “Particle” de la Asociación internacional de Mecánica Computacional (IACM), de conjunto con instituciones científicas y académicas emblemáticas de elite mundial.