

**Título del resultado:** “Desarrollo de tecnologías de avanzada para la generación y empaquetamiento de partículas enfocadas al método de los elementos discretos”

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

**Autoría:** Dr. Lic. Irvin Pablo Pérez Morales

**Otros 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 de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), La Habana, Cuba.**

4. José Bolívar Rodríguez
5. Julio Eugenio Frade De Lo Noval
6. Niria Iraida Solís Escalona
7. Widodo Suwardjo Suwardjo

**Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, España.**

8. Alberto Ferriz Canals
9. Eugenio Oñate Ibañez de Navarra (Coordinador Científico por España)
10. Ferran Arrufat Garcia
11. Francisco Zarate Araiza
12. Gerardo Socorro Mirandas
13. Guillermo Casas González
14. Jerzy Rojek
15. Juan Miquel Canet
16. Miguel Angel Celigueta Jordana
17. Miguel Enrique Cerrolaza Rivas
18. Miquel Santasusana Isach
19. Oscar Fruitos Bickham
20. Salvador Latorre Sánchez

**Empresa de Planta Mecánica, Villa Clara, Cuba.**

21. Jorge Luis Guerra Alvarez
22. Juan Carlos González Jimenez
23. Julio Pastor Matamoros Garciano

**Empresa Vértices. Holguín. Cuba**

24. Dalia Pupo Ordoño
25. Víctor Manuel Valdés Jiménez

**Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba.**

- Facultad de Ingeniería Civil
26. Eduardo Tejeda Piusseaut
  27. Félix Michael Hernández López
  28. Milena Mesa Lavista
  29. Janet Otmara Martinez Cid

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

- 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
30. Alcides Viamontes Esquivel
  31. Alejandro Duffus Scott
  32. Álvaro J. Fuentes Suárez
  33. Carlos A. Recarey Morfa (Coordinador Científico General)



34. Denis Deniz Gonzalez
35. Eduardo Miguel Fírvida Donéstevez
36. Enrique Gonzalez Martin
37. Ernesto Chagoyen Méndez
38. Gilberto Quevedo Sotolongo
39. Harold Diaz-Guzman Casañas
40. Heikel Yervilla Herrera
41. Irvin Pablo Pérez Morales (Coordinador Científico por Cuba)
42. Ismay Pérez Sanchez
43. Laura Perez Triana
44. Lucia Argüelles Cortés
45. Manuel A. Castro Fuentes
46. Marcelino Rodríguez Cancio
47. Maykel Bermúdez Casanova
48. Omar González Cueto
49. Raimel Santos Rubio
50. Raul González López
51. Roberto Roselló Valera
52. Sergio Betancourt Rodríguez
53. Yaidel Muñiz Acosta
54. Yaidel Reyes López
55. Yordanis Pérez Brito
56. Yunier Pérez Camacho

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

- Departamento de Biosistemas  
Departamento de Ciencia de la Computación
57. Bart Smeets
  58. Dirk Roose (Coordinador Científico por Bélgica)
  59. Herman Ramon
  60. Simon Vanmaercke

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

- Facultad de Ciencias Agrarias
61. Angel Lázaro Sánchez Iznaga

**Universidad de Brasilia (UnB).**

- Facultad de Tecnología (FT),  
InfraLab
62. Hernan Martínez Carvajal
  63. Liosber Medina Garcia
  64. Manoel Porfirio Cordão Neto
  65. Márcio Muñiz de Fariás (Coordinador Científico por Brasil)

- Facultad Ciencias Técnicas
66. Jorge Bonilla Rochas
  67. Rigoberto A. Pérez Reyes
  68. Aníbal Sánchez Numa
  69. Gilberto Rodriguez Plasencia

**Universidad Técnica de Manabí. Ecuador.**

- Instituto de Investigaciones Científicas, Desarrollo y Transferencias de Tecnología.
70. Miguel Herrera Suarez (Coordinador Científico por Ecuador)

**Colaboradores: 11 (Organizados por orden alfabético)**

71. Lisbeidy Guzmán Subiaurria
72. Yusnel Rojas García
73. William Felipe Prieto
74. Jorge Suit Pérez
75. Elvis López Bravo



76. César A. Chagoyen Méndez
77. Gregorio Aragón López
78. Sara Burel
79. Guilles Cadoce
80. Thien Dic Duc
81. Eduardo Soudah

**Otras entidades participantes (Organizados por orden alfabético):**

- Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (DCMTRANS), La Habana. Cuba  
Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), La Habana. Cuba  
Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona. España  
Empresa de Planta Mecánica, Villa Clara. Cuba  
Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana. Cuba  
- *Facultad de Ingeniería Civil*  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara. Cuba  
- *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*  
- *Facultad de Ciencias Agropecuarias*  
Universidad Católica de Lovaina. Bélgica  
- *Departamento de Ciencia de la Computación*  
- *Departamento de Biosistemas*  
Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez  
- *Facultad de Ciencias Agrarias*  
Universidad de Brasilia (UnB), Brasilia. Brasil  
- *Facultad de Tecnología (FT)*  
- *Laboratorio de Infraestructuras (InfraLab)*  
Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez”, Ciego de Ávila, Cuba.  
- *Facultad de Ciencias Técnicas*

Universidad Técnica de Manabí. Ecuador.

- *Instituto de Investigaciones Científicas, Desarrollo y Transferencias de Tecnología.*

**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. Los modelos discretos (modelos de partículas) se basan en el estudio de los problemas de ingeniería a una escala cada vez menor. En la actualidad, hasta la escala microscópica. Todo esfuerzo encaminado al acercamiento del micro-mundo y al estudio de sus leyes y comportamiento es una tarea de constante investigación y es precisamente en esta tendencia de investigación donde se centra la finalidad de este trabajo. El hecho de poder estudiar los fenómenos físicos a un nivel microscópico 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 a nivel microscópico 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 se centra en el desarrollo de los métodos de partículas, con especial énfasis en el método de los elementos discretos. Como todo método numérico se necesita discretizar el medio, para después formular el modelo físico y matemático, para proceder a la solución del mismo por un método numérico (en este caso el método de los elementos discretos). El trabajo de investigación, se centra en desarrollo de tecnologías de avanzada para la generación y empaquetamiento de partículas enfocadas al método de los elementos discretos. En este caso con la peculiaridad de lograr modelar geométricamente la esencia macro-



estructural y con especial énfasis en la modelación microestructural de los materiales. Los aspectos científicos más esenciales son los siguientes: 1 - El desarrollo de las técnicas de generación y empaquetamiento de partículas de formas arbitrarias (Anexo 1 y Anexo 2), 2 - El desarrollo de tecnologías (Formulación de técnicas de generación y empaquetamiento de partículas esféricas acoplado con Técnicas de Laguerre) para la obtención de microestructuras de materiales continuos como: estructuras policristalinas de aceros (micro-modelación), aceros nano-estructurados (nano modelación) y rocas (micro-modelación), entre otros materiales (Anexo 3), 3- El establecimiento de un enfoque integral para la caracterización y evaluación de la calidad de los empaquetamientos de partículas, aspecto que garantizan la fiabilidad de las simulaciones numéricas al avalar la calidad o similitud (modelaciones a nivel del micro mundo) de las mallas de partículas con el medio físico real (Anexo 4), 4 – Desarrollo de tecnologías computacionales para el análisis micro-estructural de aceros al carbono, donde se establece un procedimiento automatizado de análisis de las micrografías de aceros para identificar parámetros estructurales utilizando técnicas de procesamiento de imágenes (Anexo 5) y 5 – La aplicación de todos los desarrollo teóricos en diferentes proyectos de investigación de carácter nacional e internacional, donde se han resuelto diversos problemas de ingeniería.

La investigación presentada ha estado respaldada por la realización de: 4 Proyectos internacionales de cooperación científica con una institución de elite mundial en la temática de métodos numéricos, 7 Proyectos nacionales, 6 Proyectos Internacionales de Carácter Europeo y 5 Proyectos Internacionales con otros países (Anexo 6). 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 11 publicaciones en revista del grupo 1, 15 publicaciones en otros tipos de revistas, 17 participaciones en congresos internacionales en Cuba, donde se publicaron los resultados de esta investigación y 16 participaciones y publicaciones en congresos internacionales de relevancia mundial en la temática de mecánica computacional y métodos numéricos en la ingeniería (Anexo 7). Adicionalmente como parte del trabajo se ha desarrollado diversas investigaciones científicas que han culminado con 10 trabajos de diploma, 1 Tesis de Maestría y 4 Tesis doctorales (Anexo 8). 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 (micro-, bio-, nano-modelación) de problemas numéricos con métodos de partículas. 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 9).

### Aportaciones por Instituciones:

Centro <i>(Organizado por Orden Alfabético)</i>	Contribuciones	Aportes
1. Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (DCMTRANS), La Habana, Cuba.	Desarrollo de las técnicas para modelación de problemas de balística de efecto y blindaje. Aplicaciones de las tecnologías desarrolladas en función del proyecto Tarea Triunfo (Anexo 6).	10 %
2. Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), La Habana, Cuba.	Desarrollo de las técnicas para modelación de problemas de balística de efecto y blindaje. Ensayos y caracterización de materiales desarrollados para el proyecto de Tarea Triunfo (Anexo 6).	3 %
3. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, España.	Desarrollo teóricos de las formulaciones abordadas en el trabajo y aplicaciones a diversos campos de la ingeniería civil y mecánica. Desarrollo de las formulaciones en función de los proyectos de Cooperación UCLV-CIMNE (Anexo 6). Aplicaciones de las tecnologías desarrolladas en función de los Proyectos Europeos (Anexo 6).	12 %
4. Empresa de Planta Mecánica, Villa Clara, Cuba.	Desarrollo de las técnicas para modelación de problemas de balística de efecto y blindaje. Ensayos y	3 %



	caracterización de materiales desarrollados para el proyecto de Tarea Triunfo.	
5. Empresa Vértices. Holguín. Cuba	Desarrollo de las técnicas para la modelación dinámica de estructuras y el terreno. Aplicaciones Estructurales.	2 %
6. Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba.	Desarrollo de las técnicas para modelación de pavimentos asfálticos y de hormigón. Ensayos y caracterización de materiales desarrollados para el proyecto CAPES-MES 200/13 “Modelación y diseño de terraplenes y pavimentos, empleando técnicas de simulación numérica” (Anexo 6).	3 %
7. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba. - Centro de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería. - Facultad de Ciencias Agropecuarias - Facultad de Construcciones - Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. - Facultad de Matemática Física y Computación.	Caracterización de diversos materiales con tecnologías de avanzada. Incidencias en los proyectos de cooperación, internacionales y nacionales (Anexo 6). Desarrollo y aplicaciones de las técnicas de generación para modelación geométrica de suelos y herramientas de Corte para la modelación de problemas en desgastes. Desarrollo teóricos de técnicas de modelación micro de materiales y aplicaciones a geomateriales (rocas y hormigones). Aplicaciones en el contexto del proyecto VLIR (Anexo 6). Desarrollo teóricos de modelación micro de materiales (aceros) y caracterización e identificación de propiedades de aceros. Desarrollo teóricos de las formulaciones abordadas en el trabajo y aplicaciones a diversos campos de la ingeniería civil y mecánica. Participación del Grupo Científico Estudiantil. Participación en proyectos nacionales e internacionales (Anexo 6)	44.5 %
8. KU Leuven (Universidad Católica de Lovaina) - Departamento de Biosistemas - Departamento de Ciencia de la Computación	Desarrollo teóricos de las formulaciones abordadas en el trabajo y aplicaciones a diversos campos de la ingeniería y bioingeniería. Proyecto VLIR (Anexo 6).	6.25 %
9. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez - Facultad de Ciencias Agrarias	Desarrollo y aplicaciones de las técnicas de generación para modelación geométrica de suelos y herramientas de Corte para la modelación de problemas en desgastes.	3 %
10. Universidad de Brasilia (UnB), Brasilia, Brasil. - Facultad de Tecnología (FT) - Laboratorio de Infraestructuras (InfraLab)	Desarrollo teóricos de las formulaciones desarrolladas en el trabajo y aplicaciones a diversos campos de la ingeniería civil. Caracterización de diversos materiales con tecnologías de avanzada. Proyectos CAPES MES 200/13 y Proyectos CAPES MES 208/13, otros proyectos internacionales (Anexo 6)	6.25 %
11. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba. - Facultad de Ciencias Técnicas,	Desarrollo y aplicaciones de las técnicas de generación para modelación geométrica de herramientas de Corte para la modelación en problemas de desgastes.	5 %
12. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. Instituto de Investigaciones Científicas, Desarrollo y Transferencias de Tecnología.	Desarrollo y aplicaciones de las técnicas de generación para modelación geométrica de suelos y herramientas de Corte para la modelación en problemas de desgastes.	2 %



**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. – 10 %</b>	
1. Antonio Jesús Linares Alfonso	3.5 %
2. Eduardo Sánchez Hernández	3.5 %
3. Julio Antonio Álvarez Rodríguez	3 %
<b>Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), La Habana, Cuba. – 3 %</b>	
4. José Bolívar Rodríguez	0.75 %
5. Julio Eugenio Frade De Lo Noval	0.75 %
6. Niria Iraida Solís Escalona	0.75 %
7. Widodo Suwardjo Suwardjo	0.75 %
<b>Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, España. – 12 %</b>	
8. Alberto Ferriz Canals	1 %
9. Eugenio Oñate Ibañez de Navarra	3 %
10. Ferran Arrufat Garcia	0.5 %
11. Francisco Zarate Araiza	1 %
12. Gerardo Socorro Mirandas	1 %
13. Guillermo Casas González	0.5 %
14. Jerzy Rojek	0.5 %
15. Juan Miquel Canet	0.5 %
16. Miguel Angel Celigueta Jordana	1 %
17. Miguel Enrique Cerrolaza Rivas	0.5 %
18. Miquel Santasusana Isach	0.5 %
19. Oscar Fruitos Bickham	1 %
20. Salvador Latorre Sánchez	1 %
<b>Empresa de Planta Mecánica, Villa Clara, Cuba. – 3 %</b>	
21. Jorge Luis Guerra Alvarez	1 %
22. Juan Carlos González Jimenez	1 %
23. Julio Pastor Matamoros Garcia	1 %
<b>Empresa Vértices. Holguín. Cuba – 2 %</b>	
24. Dalia Pupo Ordoño	1 %
25. Víctor Manuel Valdés Jiménez	1 %
<b>Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba – 4 %</b>	
26. Eduardo Tejeda Piusseaut	1 %
27. Félix Michael Hernández López	1 %
28. Milena Mesa Lavista	1 %
29. Janet Otmara Martinez Cid	1 %
<b>Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba. – 44.5 %</b>	
30. Alcides Viamontes Esquivel	1 %
31. Alejandro Duffus Scott	2 %
32. Álvaro J. Fuentes Suárez	2 %
33. Carlos A. Recarey Morfa	4 %
34. Denis Deniz González	1 %
35. Eduardo Miguel Fírvida Donéstevéz	1 %
36. Enrique Gonzalez Martin	1 %
37. Ernesto Chagoyen Méndez	1 %
38. Gilberto Quevedo Sotolongo	1 %
39. Harold Diaz-Guzman Casañas	1 %
40. Heikel Yervilla Herrera	1 %



41. Irvin Pablo Pérez Morales	5 %
42. Ismay Pérez Sanchez	1 %
43. Laura Perez Triana	1 %
44. Lucía Argüelles Cortes	4 %
45. Manuel A. Castro Fuentes	3 %
46. Marcelino Rodríguez Cancio	1 %
47. Maykel Bermúdez Casanova	1 %
48. Omar González Cueto	1 %
49. Raimel Santos Rubio	1 %
50. Raul Gonzalez López	1 %
51. Roberto Roselló Valera	4 %
52. Sergio Betancourt Rodríguez	1 %
53. Yaidel Muñoz Acosta	1 %
54. Yaidel Reyes López	1.5 %
55. Yordanis Pérez Brito	1 %
56. Yuniel Pérez Camacho	1 %
<b>KU Leuven (Universidad Católica de Lovaina), Leuven, Bélgica. – 6.25 %</b>	
57. Bart Smeets	1.625 %
58. Dirk Roose	2 %
59. Herman Ramon	1 %
60. Simon Vanmaercke	1.625 %
<b>Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba. – 3 %</b>	
61. Angel Lázaro Sánchez Iznaga	3 %
<b>Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil. – 6.25 %</b>	
62. Hernán Martínez Carvajal	1.25 %
63. Liosber Medina García	1 %
64. Manoel Porfírio Cordão Neto	1 %
65. Márcio Muniz de Farias	3 %
<b>Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez. Ciego de Avila, Cuba. – 5 %</b>	
66. Jorge Bonilla Rochas	1.5 %
67. Rigoberto A. Pérez Reyes	1.5 %
68. Aníbal Sánchez Numa	1 %
69. Gilberto Rodríguez Plasencia	1 %
<b>Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. – 2 %</b>	
70. Miguel Herrera Suárez	2 %

**Autor para la correspondencia:**

**Dr. Lic. Irvin Pablo Pérez Morales.**

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: [ipm@uclv.edu.cu](mailto:ipm@uclv.edu.cu)



## 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. Enriquecido por las conquistas y desarrollo de la matemática, la computación y el enfoque sistémico, la modelación 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 del método de la 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 propiciado el desarrollo de nuevos métodos numéricos como es el caso del Método de los Elementos Discretos o Distintos (MED), como también se le conoce. Los métodos de partículas, que incluyen al MED, son técnicas muy novedosas para el estudio de medios discretos donde se manifiesten fenómenos de discontinuidades. En la actualidad lo que es más novedoso y es tema de estudio en este trabajo científico es enfocar dichas formulaciones al estudio del micro mundo.

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 discretos (modelos de partículas) se basan en el estudio de los problemas de ingeniería a una escala cada vez menor y en la actualidad, hasta la escala microscópica. Todo trabajo investigativo que intente el estudio del 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 un nivel microscópico 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 a nivel microscópico 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 el método de los elementos discretos. Como todo método numérico este necesita discretizar el medio, para una vez formulado el modelo físico y se establezca el modelo matemático, proceder a la solución del mismo por un método numérico (sobre el medio discretizado), que en este caso es el método de los elementos discretos. El trabajo de investigación, se centra en desarrollo de tecnologías de avanzada para la generación y empaquetamiento de partículas como malla inicial del método de los elementos discretos. En este caso con la peculiaridad de lograr modelar geométricamente la esencia macro-estructural y con especial énfasis en la modelación micro-estructural de los materiales.

Los aspectos científicos esenciales en esta investigación son los siguientes: 1 - El desarrollo de las técnicas de generación y empaquetamiento de partículas de formas arbitrarias (Anexo 1 y Anexo 2), 2 - El desarrollo de tecnologías (Formulación de técnicas de generación y empaquetamiento de partículas esféricas acoplado con Técnicas de Laguerre) para la obtención de microestructuras de materiales continuos como: estructuras policristalinas de aceros (micro-modelación), aceros nano-estructurados (nano modelación) y rocas (micro-modelación), entre otros materiales (Anexo 3), 3- El establecimiento de un enfoque integral para la caracterización y evaluación de la calidad de los empaquetamientos de partículas, aspecto que garantizan la fiabilidad de las simulaciones numéricas, al avalar la calidad o similitud (modelaciones a nivel del micro mundo) de las mallas de partículas con el medio físico real (Anexo 4), 4 – Desarrollo de tecnologías computacionales para el análisis micro-estructural de aceros al carbono, donde se establece un procedimiento automatizado de análisis de las micrografías de aceros para identificar parámetros estructurales utilizando técnicas de procesamiento de imágenes (Anexo 5) y 5 – La aplicación de todos los desarrollo teóricos en diferentes proyectos de investigación de carácter nacional e internacional, donde se han resuelto diversos problemas de ingeniería.

Los principales resultados en el desarrollo de las técnicas de generación de partículas de formas arbitrarias (Anexo 1 y Anexo 2) han permitido establecer una formulación que es un aporte sustancial al campo de la ciencia en lo que respecta a las técnicas de empaquetamiento de partículas, como conjunto inicial (malla) para el método de los elementos discretos. Esta formulación es una técnica de empaquetamiento de partículas, basado en un método constructivo de avance frontal, la cual, es una formulación muy general para esta finalidad, aspecto no reportado en la literatura científica de la temática. En la misma se estableció la posibilidad de emplear con una misma formulación el empleo de diversos tipos de partículas y diversas formas de lograr el contacto entre ellas. En el caso de partículas irregulares o mejor expresado partícula reales de formas diversas (Anexo 2) se ha resuelto por tres técnicas, aspecto que garantiza modelar varios medios físicos reales.

El algoritmo se formuló con una arquitectura abierta en cuanto al establecimiento del conjunto inicial de partículas o frente de avance (Anexo 2 y 3). Adicionalmente se establece un enfoque genérico y global para establecer el frente de avance (partícula pivote y partícula vecinas: seleccionando todas las combinaciones - 9 posibles: a lo ancho, a lo profundo o aleatorio). El problema de la construcción de la partículas en contacto exterior con otras se formuló con varias alternativas (Anexo 2 y 3). Estos métodos son aportes no reportados en la literatura y se aplican a partículas conformadas con forma exacta, aproximadas y irregulares, de ahí la generalidad y novedad de este aspecto. La formulación es genérica para cualquier tipo de partícula y cumple con los requerimientos necesarios para ser empleado en la formulación de técnicas de generación y empaquetamiento de sistemas de partículas por métodos de avance frontal. Finalmente a modo de ilustración en esta propuesta de premio se efectúan un grupo de aplicaciones del algoritmo para demostrar la efectividad de uso de las técnicas establecidas (Anexo 1 y 3). Las aplicaciones concretas de estas formulación se evidencia en su uso en los diferentes proyectos de investigación que han sido aplicadas, lo que demuestra la diversas finalidades del mismo (Anexo 6).



El desarrollo teórico efectuado con algunas variaciones en la formulación posibilita además generar nubes de puntos para el método SPH (Anexo 8), que es una tecnología de partículas para modelaciones a escala macro. El uso de esta técnica se evidencia en algunas de las tesis doctorales (Anexo 8) que forman parte de la propuesta de premio y donde se hizo uso de las formulaciones desarrolladas haciendo algunas modificaciones básicas.

La influencia de las heterogeneidades micro-estructurales en el estudio de los materiales “continuos” es un tema de vital importancia, la cual, explica la necesidad de generar materiales virtuales equivalentes estadísticamente a la microestructura considerada, y conectar esta descripción geométrica con los diferentes métodos numéricos en el contexto de la mecánica computacional. Este aspecto propicia la necesidad de desarrollar algoritmos que permitan modelar virtualmente las estructuras policristalinas de diversos materiales (aceros, rocas, etc.). En este sentido es que se realiza otra de las aportaciones del trabajo, que es el desarrollo de tecnologías para la obtención de microestructuras de materiales continuos como: estructuras policristalinas de aceros (micro-modelación), aceros nano-estructurados (nano modelación) y rocas (micro-modelación), entre otros materiales (Anexo 3). En este caso se combina la formulación de técnicas de generación y empaquetamiento de partículas (partículas esféricas en este caso) acoplado con Técnicas de Laguerre, a la que se le unen otras tecnologías colaterales como las de procesamiento de imágenes.

El algoritmo presentado combina las técnicas de procesamiento de imágenes para segmentar los granos de las estructuras policristalinas, las técnicas de empaquetamiento de partículas y las celdas de Laguerre. Las técnicas de generación de partículas (esféricas en este caso) se basa en un algoritmo de avance frontal (Anexo 1 y 3) que toma como datos de entrada las distribuciones estadísticas de las esferas inscritas en los policristales de la microestructura de los materiales. Formulando el algoritmo (Anexo 3) a modo de ilustración, se hacen algunas aplicaciones puntuales del mismo, al caso de materiales policristalinos metálicos y rocas reales para demostrar la efectividad de la formulación. Las aplicaciones concretas de estas formulaciones se pueden evidenciar en los diferentes proyectos de investigación donde han sido aplicadas (Anexo 6).

Otro aporte del trabajo es el establecimiento de un enfoque integral para la caracterización y evaluación de la calidad de los empaquetamientos de partículas, aspecto que garantizan la fiabilidad de las simulaciones numéricas al avalar la calidad o similitud (modelaciones a nivel del micro mundo) de las mallas de partículas con el medio físico real (Anexo 4). En dicho trabajo se conceptualizó una metodología que aglutina varias técnicas de caracterización de los empaquetamientos de partículas. Esta clasificación e integración de varias técnicas que permite efectuar un proceso de caracterización y evaluación sistémica de los empaquetamientos de partículas, para garantizar la calidad de las mallas iniciales del método de los elementos discretos tanto a nivel de la macro como la micro-escala. Con esta formulación se establecieron las bases que permiten realizar investigaciones muy necesarias en temas de mecánica de partículas, que aún no están investigadas y reportadas en la literatura científica de la temática. Se hace una evaluación integral que incluye, evaluación de las formas y dimensiones de las partículas, nivel de ocupación del espacio, homogeneidad, isotropía y nivel de conectividad del mismo, entre otros aspectos de interés. En cuanto a las dimensiones y formas de las partículas se emplean diversas técnicas establecidas y se hace uso de varios conceptos de dimensiones equivalentes, que son parámetros muchos más viables para caracterizar partículas de formas y dimensiones arbitrarias, como las que aparecen en la naturaleza y en la práctica ingenieril. Colateralmente se acopla a este proceso las técnicas convencionales de caracterización de granos (partículas) y su procesamiento estadístico, aspecto que refuerza la fiabilidad del proceso de caracterización de las dimensiones de las partículas. Se establece un sistema global de caracterización y evaluación sistémica de empaquetamientos de partículas basados en sistemas de inferencia difusa, aspecto que permite que



cada investigador en función de la finalidad de su investigación, establezca un criterio único de caracterización y evaluación. Las técnicas establecida para caracterizar los empaquetamientos de partículas permiten con facilidad caracterizar problemas a nivel de la micro-escala (geometrías continuas –microestructuras de aceros, rocas, etc. y geometrías discretas) y la macro-escala.

El Desarrollo de tecnologías computacionales para el análisis micro-estructural de aceros al carbono es otro aporte de trabajo presentado. En el mismo se establece un procedimiento automatizado de análisis de las micrografías de aceros para identificar parámetros estructurales utilizando técnicas de procesamiento de imágenes (Anexo 5). Esta aplicación cumple con los requerimientos planteados por los especialistas en el área de la Ciencia de los Materiales y es un salto en el desarrollo de la ciencia de los materiales. De forma ilustrativa uno de los casos de estudio definido permitió demostrar la calidad de los resultados obtenidos con la aplicación, demostrando su efectividad. Al realizar pruebas estadísticas para comparar sus resultados con los obtenidos a partir de otra aplicación, las diferencias existentes entre estos resultaron pueden ser medianamente o muy significativas, a favor de la aplicación implementada. Se sugiere extender la aplicación a otras funcionalidades del análisis de las micrografías de aceros, como la determinación del tamaño de granos; y realizar un estudio de técnicas de Inteligencia Artificial para comprobar la factibilidad de aplicarlas en la utilización de la optimización de los parámetros del procesamiento automático. Lo relacionado con la determinación de tamaño de grano (Anexo 4) ya teóricamente ha sido formulado y es la base para la continuidad del trabajo. Además, pruebas preliminares muestran que el procedimiento utilizado en la aplicación puede ser empleado para el análisis de imágenes de hormigón, por lo que se recomienda valorar las posibilidades de extender las funcionalidades de la aplicación con este fin. La aplicación puntual de esta tecnología se evidencia en algunos de los proyectos desarrollados (Anexo 6), con especial énfasis en el proyecto de Tarea Triunfo.

En todo su conjunto la investigación presentada ha estado respaldada por la realización de: 4 Proyectos internacionales de cooperación científica con una institución de elite mundial en la temática de métodos numéricos, 7 Proyectos nacionales, 6 Proyectos Internacionales de Carácter Europeo y 5 Proyectos Internacionales con otros países (Anexo 6). 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 11 publicaciones en revista del grupo 1, 15 publicaciones en otros tipos de revistas, 17 participaciones en congresos internacionales en Cuba, donde se publicaron los resultados de esta investigación y 16 participaciones y publicaciones en congresos internacionales de relevancia mundial en la temática de mecánica computacional y métodos numéricos en la ingeniería (Anexo 7). Adicionalmente como parte del trabajo se ha desarrollado diversas investigaciones científicas que han culminado con 10 trabajos de diploma, 1 Tesis de Maestría y 4 Tesis doctorales (Anexo 8). 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.

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 (micro, bio, nano-modelación) de problemas numéricos con métodos de partículas, con especial énfasis al campo de la modelación micro y nano, aspectos que so tema de relevancia mundial. 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 9).