



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TESIS DOCTORAL

Título
Estudio de la segregación de una mezcla granular en una máquina compresora mediante el método de los elementos discretos (DEM)
Autor/es
Laura Martínez Martínez
Director/es
Ana González Marcos y Fernando Alba Elías
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Departamento
Ingeniería Mecánica
Curso Académico



Estudio de la segregación de una mezcla granular en una máquina compresora mediante el método de los elementos discretos (DEM), tesis doctoral de Laura Martínez Martínez, dirigida por Ana González Marcos y Fernando Alba Elías (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

© El autor
© Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2017
publicaciones.unirioja.es
E-mail: publicaciones@unirioja.es



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DOCTORADO EN DISEÑO E INGENIERIA DE PRODUCTO Y DE PROCESOS
INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA
GRANULAR EN UNA MÁQUINA COMPRESORA
MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS
DISCRETOS (DEM)

AUTOR

DÑA LAURA MARTÍNEZ MARTÍNEZ

DIRECTORES

DRA. D^a. ANA GONZÁLEZ MARCOS

DR. D. FERNANDO ALBA ELÍAS

CORDOVÍN, JULIO DE 2017

RESUMEN

En esta investigación se muestra la aplicación de técnicas DEM (*Discrete Element Method*) en el estudio de los fenómenos de segregación que se producen en el depósito alimentador de una máquina compresora de material pulverulento (tipo excéntrica monopunzón). El método de elementos discretos, enmarcado en la familia de métodos numéricos, permite simular modelos parametrizados de sistemas granulares sólidos y materiales discontinuos. Concretamente, el software empleado es EDEM®, en el que se puede implementar la geometría de los elementos a simular, o importarla de una herramienta CAD. Así, se persigue estudiar la segregación de ciertos ingredientes de una mezcla (normalmente aquellos con mayor tamaño o densidad) que se produce dentro del depósito alimentador de una máquina compresora excéntrica. Para ello, se realiza un ajuste de los parámetros del modelo simulado (principalmente los coeficientes de fricción) mediante la comparación con pruebas con un prototipo de policarbonato. Una vez ajustado el modelo, se comprueba que es posible simular el proceso de segregación. Esto permite, la modificación de ciertos parámetros como pueden ser la geometría del depósito para mitigar en la medida de lo posible dichos fenómenos, sin llevar a cabo numerosas y costosas pruebas reales de laboratorio.

Palabras clave: segregación, máquina compresora, elementos discretos, DEM

ABSTRACT

Main goal of this work is to present the application of discrete element method (DEM) to study the segregation phenomena that occur in the feed hopper of a tablet compression machine ('single punch' eccentric press). The discrete element method, which is classified in the family of numerical methods, allows simulating parameterized models of granular systems and discontinuous materials. Specifically, the software used to carry out these analyses is EDEM®, in which it is possible to either implement the geometry of the elements to simulate or import it from a CAD tool. Thus, the aim of this study is to obtain deeper knowledge about the segregation of certain ingredients of a mixture (usually with larger size or density) that occurs within a feed hopper of an eccentric compression machine. For this purpose, the model parameters (mainly the coefficients of friction) are adjusted by comparison with compression tests performed with polycarbonate prototype. Once the model is adjusted, it is possible to simulate the segregation process. This allow us to modify the geometry of the hopper in order to mitigate these phenomena as far as possible, without carrying out extensive and expensive real laboratory tests.

Keywords: segregation, compression machine, discrete elements, DEM.

AGRADECIMIENTOS

Todo mi agradecimiento a mis directores de tesis Ana y Fernando, por su inestimable ayuda y guía durante estos años, sin vosotros no hubiera sido posible.

A mis compañeros de universidad y de investigación Elisa Sainz García y Cristina Ramírez Aragón, por su implicación y su intercambio de conocimientos.

Y por su puesto a mi familia, que siempre me ha apoyado y animado en esta etapa de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	OBJETIVOS	4
1.2	ANTECEDENTES.....	4
1.2.1	<i>FASE I de los antecedentes. Simulación del carro “Real”</i>	5
1.2.1.1	Materiales empleados en la fase I.	5
1.2.1.1.1	Maquina compresora.....	5
1.2.1.1.2	Ingredientes de la mezcla	6
1.2.1.2	Simulación del proceso de compresión. Aproximación del carro “2D”	7
1.2.1.2.1	Carro simulado.....	7
1.2.1.2.2	Modelo empleado para la simulación de los ingredientes	8
1.2.1.3	Conclusión de la fase I de los antecedentes.	9
1.2.1.3.1	Validación del modelo 3D	9
1.2.1.3.2	Zonas y mecanismos de segregación	9
1.2.2	<i>FASE II de los antecedentes. Simulación del carro “Policarbonato”</i>	10
1.2.2.1	Materiales empleados en la fase II de los antecedentes	10
1.2.2.1.1	Máquina compresora utilizada:	10
1.2.2.1.2	Ingredientes de la Mezcla	11
1.2.2.1.3	Llenado del carro	12
1.2.2.2	Simulación del proceso de compresión	14
1.2.2.2.1	Modelo empleado para la simulación del carro.....	14
1.2.2.2.2	Modelo empleado para la simulación de los ingredientes de la mezcla.....	14
1.2.2.3	Conclusiones de la fase II de los antecedentes.....	15
1.2.2.3.1	Análisis de la segregación durante el proceso de llenado del carro “quasi-3D” ..	15
1.2.2.3.2	Análisis de la segregación durante el proceso de vaciado del carro “quasi-3D” ..	16
2	ESTADO DEL ARTE.....	23
2.1	MATERIALES GRANULARES	23
2.2	PROCESO DE SEGREGACIÓN. EFECTO DE LAS NUECES DE BRASIL	24
2.3	DEM.....	27
2.4	LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	30
2.5	SEGREGACIÓN PRODUCIDA DURANTE LA DESCARGA DE DEPÓSITOS	31
2.6	SIMULACIÓN DE MATERIALES GRANULARES.....	34
2.7	SEGREGACIÓN PRODUCIDA DURANTE EL LLENADO DE MATRICES.....	37

3	SEGREGACION DE MATERIALES PARTICULADOS.....	45
3.1	FENÓMENO DE SEGREGACIÓN	45
3.2	MECANISMOS DE SEGREGACIÓN	46
3.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MEZCLA DE SÓLIDOS	47
4	METODOLOGÍA.....	51
4.1	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	53
4.2	ANÁLISIS EXPERIMENTAL	54
4.2.1	<i>Descripción del equipo</i>	54
4.2.1.1	Máquina empleada.....	54
4.2.1.2	Carros alimentadores empleados	55
4.2.1.3	Configuraciones del carro alimentador	56
4.2.2	<i>Materiales empleados</i>	59
4.2.3	<i>Mezclas empleadas</i>	60
4.2.4	<i>Métodos de llenado del carro alimentador</i>	61
4.2.5	<i>Descripción de los ensayos</i>	63
4.3	SIMULACIÓN DEM	64
4.3.1	<i>Software CAD: Catia</i>	64
4.3.2	<i>Interfaz del software EDEM</i>	65
4.3.3	<i>Creación del modelo de elementos discretos</i>	66
4.3.3.1	Definición de los cuerpos del modelo	66
4.3.3.2	Definición de las partículas	66
4.3.3.3	Definición de las características de las partículas y de los cuerpos	67
4.3.3.4	Definición de las mezclas	68
5	TOMA DE DATOS	71
5.1	FASE I. CARRO SIMPLIFICADO. AJUSTE DE PARÁMETROS.....	71
5.2	FASE II CARRO EN FORMA DE ZAPATO.	87
6	RESULTADOS.....	99
6.1	SIMULACIONES Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	99
6.1.1	<i>FASE I. Carro simplificado. Ajuste de parámetros.</i>	99
6.1.1.1	Ia. Llenado por capas	99
6.1.1.1.1	2D V 90 2 Capas Sémola-Sémola.....	99
6.1.1.1.2	2D V 90 4 Capas Sémola Sémola	102
6.1.1.1.3	2D H 90 2 Capas Sémola Sémola	105
6.1.1.1.4	2D H 90 4 Capas Sémola Sémola.....	107
6.1.1.1.5	2D V 90 2 Capas Sémola Soja	109
6.1.1.1.6	2D V 90 4 Capas Sémola Soja	110
6.1.1.1.7	2D H 90 2 Capas Sémola Soja	113
6.1.1.1.8	2D H 90 4 Capas Sémola Soja	115

6.1.1.2	Conclusiones del llenado por capas.....	116
6.1.1.3	lb. Llenado Industrial.....	118
6.1.1.3.1	2D V 90 25/75 Sémola Sémola.....	118
6.1.1.3.2	2D V 90 50/50 Sémola Sémola.....	119
6.1.1.3.3	2D V 90 75/25 Sémola Sémola.....	119
6.1.1.3.4	2D H 90 25/75 Sémola Sémola.....	120
6.1.1.3.5	2D H 90 50/50 Sémola Sémola.....	121
6.1.1.3.6	2D H 90 75/25 Sémola Sémola.....	122
6.1.1.3.7	2D V 90 25/75 Sémola Soja.....	122
6.1.1.3.8	2D V 90 50/50 Sémola Soja.....	123
6.1.1.3.9	2D V 90 75/25 Sémola Soja.....	124
6.1.1.3.10	2D H 90 25/75 Sémola Soja.....	124
6.1.1.3.11	2D H 90 50/50 Sémola Soja.....	125
6.1.1.3.12	2D H 90 75/25 Sémola Soja.....	125
6.1.1.4	Conclusiones del llenado industrial.....	126
6.1.1.5	Ic. Llenado industrial continuo.....	127
6.1.1.6	Id. Llenado industrial carro 3D.....	129
6.1.1.6.1	3D V 25/75.....	129
6.1.1.6.2	3D H 25/75.....	130
6.1.2	<i>FASE II Carro en forma de zapato.....</i>	<i>131</i>
6.1.2.1	2H-143.....	131
6.1.2.2	1V-130.....	134
6.1.2.3	2V-120.....	136
6.1.2.4	4V-120.....	137
6.1.2.5	3D 2V-120 25/75 Industrial.....	139
6.1.2.6	2D 2V-120 25/75 Continuo.....	140
6.1.3	<i>Conclusiones del vaciado de la configuración “zapato”.....</i>	<i>141</i>
6.2	ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE SEGREGACIÓN.....	144
6.3	OPTIMIZACIÓN DEL FENÓMENO DE SEGREGACIÓN.....	149
7	CONCLUSIONES.....	161
8	REFERENCIAS.....	165

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.....	- 1 -
FIGURA 1. ESQUEMA MÁQUINA DE COMPRESIÓN EXCÉNTRICA UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE LOS COMPRIMIDOS.....	5
FIGURA 2. [A] CARRO REAL [B] DISEÑO DEL CARRO “3D” DE LA COMPRESORA EN SOLID EDGE.....	7
FIGURA 3. [A] CARRO REAL [B] MODELADO DEL CARRO "3D" DE LA COMPRESORA EN SOLID EDGE Y [C] MODELADO DEL CARRO "2D" DE LA COMPRESORA EN SOLID EDGE.....	8
FIGURA 4. [A] PARTÍCULAS IMAY E IMIN, [B] MODELO IMAY, [C] MODELO IMIN.....	8
FIGURA 5. CICLO DE FORMACIÓN DE UN COMPRIMIDO. MODELO CARRO “3D”.....	9
FIGURA 6. ZONAS DE SEGREGACIÓN: [A] MEZCLA TOTAL; [B] IMIN.....	10
FIGURA 7. [A] VISTA ISOMÉTICA Y [B] DE PERFIL DE CARRO CONVENCIONAL Y CARRO “3D” (51 MM).....	11
FIGURA 8. INGREDIENTES I1 E I2.....	12
FIGURA 9. PESADAS DE 20GR.....	13
FIGURA 10. “TOLVA DE LLENADO” EN POSICIÓN DE LLENADO.....	13
FIGURA 11. [A] Y [B] CARRO “REAL” (51 MM) Y SIMULADO, [C] Y [D] CARRO “QUASI-3D” REAL Y SIMULADO.....	14
FIGURA 12. [A] PARTÍCULAS IMAY E IMIN, [B] MODELO IMAY, IMIN.....	15
FIGURA 13. PORCENTAJE DEL INGREDIENTE MINORITARIO (15% EN PESO) OBTENIDO EN LAS PRUEBAS REALES (MEDIA OBTENIDA DE 5 PRUEBAS CON INDICACIÓN DEL INTERVALO DE CONFIANZA PARA UN A = 0.05) Y EN LA SIMULACIÓN FINAL. AMBOS RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL CARRO “QUASI-3D”.....	16
FIGURA 14. DIVISIONES DEL CONTENIDO DEL CARRO E IMÁGENES REALES Y SIMULADAS DE LOS COMPRIMIDOS 1 Y 8.....	17
FIGURA 15. IMÁGENES REALES Y SIMULADAS DEL COMPRIMIDO 19.....	18
FIGURA 16. IMÁGENES REALES Y SIMULADAS DE LOS COMPRIMIDOS 26 Y 30.....	19
CAPÍTULO 2.....	- 21 -
FIGURA 17. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS ENSAYOS REALIZADOS POR LIAO [13]......	25
FIGURA 18. EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL EFECTO DE LAS NUEVES DE BRASIL EN FUNCIÓN DE LA COHESIÓN [15].	26
FIGURA 19. DEPÓSITOS CONCÉNTRICOS Y EXCÉNTRICOS ANALIZADOS EN [48]......	33
FIGURA 20. MODELO CUASI-TRIDIMENSIONAL DESARROLLADO EN [5].....	35

FIGURA 21. GEOMETRÍA DE LOS INJERTOS EMPLEADOS POR WU [9]	36
FIGURA 22. MODELOS TRIDIMENSIONALES Y SIMPLIFICADOS EMPLEADOS POR GUO EN [50]......	38
FIGURA 23. PROCESO DE LLENADO ESTÁTICO EXPLICADO EN GUO [50].	39
FIGURA 24. PROCESO DE LLENADO DINAMICO EXPLICADO EN GUO [6].	40
FIGURA 25. LLENADO DE UNA MATRIZ EN MOVIMIENTO TENIENDO EN CUANTA EL EFECTO DEL AIRE [51]......	41
CAPÍTULO 3.....	- 43 -
CAPÍTULO 4.....	49
FIGURA 26. DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL ESTUDIO.	51
FIGURA 27. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ESTUDIO.	52
FIGURA 28. PROTOTIPO Y PRINCIPALES COMPONENTES DE LA MÁQUINA.	55
FIGURA 29. CARRO 2D (A) Y CARRO 3D (B).	56
FIGURA 30. CONFIGURACIÓN VERTICAL.....	56
FIGURA 31. CONFIGURACIÓN HORIZONTAL.	57
FIGURA 32. CONFIGURACIÓN 2H-143.....	57
FIGURA 33. CONFIGURACIÓN 1V-130.	58
FIGURA 34. CONFIGURACIÓN 2V-120.	58
FIGURA 35. CONFIGURACIÓN 4V-120.	59
FIGURA 36 MATERIAL GRANULAR DE SÉMOLA DE TRIGO (A) Y MATERIAL GRANULAR DE SOJA (GRUESO) Y MIJO (FINO) (B).	60
FIGURA 37. CARRO ALIMENTADOR TRAS EL LLENADO POR CAPAS (A) Y TRAS EL LLENADO INDUSTRIAL (B).	61
FIGURA 38. TOLVAS EMPLEADAS EN EL LLENADO INDUSTRIAL.....	62
FIGURA 39. FRACCIONES DE MEZCLA BINARIA EMPLEADAS PARA EL LLENADO DE LA TOLVA,;IZDA SÉMOLA DE TRIGO, DCHA SOJA Y MIJO.....	62
FIGURA 40. TAMIZADO DE LAS MUESTRAS. [53]	63
FIGURA 41. BÁSCULA, TAMIZ Y TUBOS DE ENSAYO. [53]	64
FIGURA 42. PESTAÑAS CONFIGURACIÓN EDEM®.	65
FIGURA 43. CUERPOS DEFINIDOS EN EL MODELO DE SIMULACIÓN.	66
FIGURA 44. DEFINICIÓN DE LAS PARTÍCULAS DEL MODELO DE SIMULACIÓN. SÉMOLA-SÉMOLA.....	67
FIGURA 45. DEFINICIÓN DE LAS PARTÍCULAS DEL MODELO DE SIMULACIÓN. SÉMOLA –SOJA.....	67
CAPÍTULO 5.....	- 69 -
FIGURA 46. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO SÉMOLA – SÉMOLA 2D-VERTICAL 50/50 2CAPAS (A), 2D-VERTICAL 50/50 4CAPAS (B), 2D-HORIZONTAL 50/50 2CAPAS (C) Y 2D-HORIZONTAL 50/50 4CAPAS (D).	72
FIGURA 47. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D VERTICAL Y HORIZONTAL. LLENADO POR CAPAS. SÉMOLA- SÉMOLA.....	73
FIGURA 48. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO SÉMOLA – SOJA 2D-VERTICAL 50/50 2CAPAS (A), 2D-VERTICAL 50/50 4CAPAS (B), 2D-HORIZONTAL 50/50 2CAPAS (C) Y 2D-HORIZONTAL 50/50 4CAPAS (D).	74

FIGURA 49. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D VERTICAL Y HORIZONTAL. LLENADO POR CAPAS. SÉMOLA- SOJA	75
FIGURA 50. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO SÉMOLA-SÉMOLA 2D-VERTICAL-25/75 INDUSTRIAL (A), 2D-VERTICAL 50/50 INDUSTRIAL (B) Y 2D-VERTICAL 75/25 INDUSTRIAL (C).	77
FIGURA 51. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO SÉMOLA-SOJA 2D-VERTICAL 25/75 INDUSTRIAL (A), 2D-VERTICAL 50/50 INDUSTRIAL (B) Y 2D-VERTICAL 75/25 INDUSTRIAL (C).	77
FIGURA 52. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D VERTICAL. LLENADO INDUSTRIAL. SÉMOLA-SÉMOLA.....	78
FIGURA 53. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D VERTICAL. LLENADO INDUSTRIAL. SOJA-SÉMOLA	79
FIGURA 54. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO SÉMOLA-SÉMOLA 2D-HORIZONTAL 25/75 INDUSTRIAL (A), 2D-HORIZONTAL 50/50 INDUSTRIAL (B) Y 2D-HORIZONTAL 75/25 INDUSTRIAL (C).	80
FIGURA 55. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D HORIZONTAL. LLENADO INDUSTRIAL. SÉMOLA-SÉMOLA.....	81
FIGURA 56. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D HORIZONTAL. LLENADO INDUSTRIAL. SÉMOLA-SOJA	82
FIGURA 57. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO 3D-HORIZONTAL 25/75 INDUSTRIAL (A), 3D-VERTICAL 25/75 INDUSTRIAL (B).....	83
FIGURA 58. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 3D HORIZONTAL Y VERTICAL. LLENADO INDUSTRIAL.	84
FIGURA 59. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN EL ENSAYO 2D-HORIZONTAL-25F-75G-INDUSTRIAL-CONTINUO AL INICIO DEL ENSAYO (A), 2D-HORIZONTAL-75F-25G-INDUSTRIAL (B), 2D-HORIZONTAL-25F-75G-INDUSTRIAL.....	85
FIGURA 60. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D HORIZONTAL. LLENADO CONTINUO.	86
FIGURA 61. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN LA POSICIÓN 2D 2H-143 25/75 INDUSTRIAL (A), 2D 2H-143 50/50 INDUSTRIAL (B) 2D 2H-143 75/25 INDUSTRIAL (C).....	87
FIGURA 62. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2H-143. LLENADO INDUSTRIAL	88
FIGURA 63. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN LA POSICIÓN 2D 1V-130 25/75 INDUSTRIAL (A), 2D 1V-130 50/50 INDUSTRIAL (B) 2D 1V-130 75/25 INDUSTRIAL (C)	89
FIGURA 64. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 1V-130. LLENADO INDUSTRIAL	90
FIGURA 65. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN LA POSICIÓN 2D 2V-120 25/75 INDUSTRIAL (A), 2D 2V-120 50/50 INDUSTRIAL (B) 2D 2V-120 75/25 INDUSTRIAL (C)	91
FIGURA 66. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2V-120. LLENADO INDUSTRIAL	92
FIGURA 67. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN LA POSICIÓN 2D 4V-120 25/75 INDUSTRIAL (A), 2D 4V-120 50/50 INDUSTRIAL (B) 2D 4V-120 75/25 INDUSTRIAL (C)	93
FIGURA 68. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 4V-120. LLENADO INDUSTRIA.....	94
FIGURA 69. SITUACIÓN INICIAL DEL CARRO ALIMENTADOR EN LA POSICIÓN 3D 2V-120 25/75 INDUSTRIAL	95
FIGURA 70. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 3D 2V-120. LLENADO INDUSTRIAL ...	96

FIGURA 71. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA CONFIGURACIÓN 2D 2V-120. LLENADO CONTINUO. ...	96
CAPÍTULO 6.....	97
FIGURA 72.SITUACIÓN INICIAL EN EL ENSAYO 2D VERTICAL. LLENADO 2 CAPAS. SÉMOLA – SÉMOLA.	99
FIGURA 73. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 2 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	100
FIGURA 74. COMPARATIVA ENTRE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTAL.2D VERTICAL 90 2CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. ESTADO INICIAL.....	100
FIGURA 75. COMPARATIVA ENTRE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTAL.2D VERTICAL 90 2CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 1.	101
FIGURA 76. COMPARATIVA ENTRE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTAL.2D VERTICAL 90 2CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 5.	101
FIGURA 77. SIMULACIÓN.2D VERTICAL 90 2CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 10.	102
FIGURA 78 .SITUACIÓN INICIAL EN EL ENSAYO 2D VERTICAL. LLENADO 4 CAPAS. SÉMOLA – SÉMOLA.	102
FIGURA 79. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 4 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	103
FIGURA 80. PRUEBA EXPERIMENTAL VS SIMULACIÓN.2D VERTICAL 90 4CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. ESTADO INICIAL.	103
FIGURA 81. PRUEBA EXPERIMENTAL VS SIMULACIÓN.2D VERTICAL 90 4CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 3.....	104
FIGURA 82. PRUEBA EXPERIMENTAL VS SIMULACIÓN.2D VERTICAL 90 4CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 6.....	104
FIGURA 83 .SITUACIÓN INICIAL EN EL ENSAYO 2D HORIZONTAL. LLENADO 4 CAPAS. SÉMOLA – SÉMOLA....	105
FIGURA 84. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 2 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.	105
FIGURA 85. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. ESTADO INICIAL.	106
FIGURA 86. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 4.	106
FIGURA 87. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 6.	106
FIGURA 88 .SITUACIÓN INICIAL EN EL ENSAYO 2D VERTICAL. LLENADO 4 CAPAS. SÉMOLA – SÉMOLA	107
FIGURA 89. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 4 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	107
FIGURA 90. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. ESTADO INIAL.	108
FIGURA 91. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 3.	108
FIGURA 92. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SÉMOLA. MUESTRA 8.	108
FIGURA 93. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 4 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	109
FIGURA 94. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. ESTADO INICIAL.....	109
FIGURA 95. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 6.....	110
FIGURA 96. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 11.....	110

FIGURA 97. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 4 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	111
FIGURA 98. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. ESTADO INICIAL.....	111
FIGURA 99. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 4.....	112
FIGURA 100. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 8.....	112
FIGURA 101. SIMULACIÓN 2D VERTICAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 11.....	112
FIGURA 102. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 4 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	113
FIGURA 103. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. SITUACION INICIAL.	113
FIGURA 104. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 3.....	113
FIGURA 105. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 6.....	114
FIGURA 106. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 2 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 10.....	114
FIGURA 107. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 4 CAPAS. SÉMOLA-SÉMOLA.....	115
FIGURA 108. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. ESTADO INICIAL.	115
FIGURA 109. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 3.....	115
FIGURA 110. SIMULACIÓN 2D HORIZONTAL 90 4 CAPAS. SÉMOLA SOJA. MUESTRA 7.	116
FIGURA 111. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE EL LLENADO POR 2 O 4 CAPAS.....	117
FIGURA 112. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	118
FIGURA 113. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 50/50. SÉMOLA-SÉMOLA.	119
FIGURA 114. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 75/25. SÉMOLA-SÉMOLA.	119
FIGURA 115. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	120
FIGURA 116. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 50/50. SÉMOLA-SÉMOLA.	121
FIGURA 117. DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD DE LAS PARTICULAS GRUESAS Y FINAS DURANTE LA ESTABILIZACIÓN DE LAS PARTICULAS EN EL LLENADO. IMAGEN EDEM.....	121
FIGURA 118. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 75/25. SÉMOLA-SÉMOLA.	122
FIGURA 119. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 25/75. SÉMOLA-SOJA.....	122
FIGURA 120. EFECTO NUECES DE BRASIL EN EL COMPRIMIDO 17 DE LA PRUEBA REAL 2D VERTICAL 25/75. SÉMOLA-SOJA.	123
FIGURA 121. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 50/50. SÉMOLA-SOJA.....	123
FIGURA 122. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 75/25. SÉMOLA-SOJA.....	124

FIGURA 123. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 25/75. SÉMOLA-SOJA.	124
FIGURA 124. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 50/50. SÉMOLA-SOJA.	125
FIGURA 125. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 75/25. SÉMOLA-SOJA.	125
FIGURA 126. COMPARATIVA DE ERRORES CUADRATICOS MEDIOS CONTRA LAS DIFERENTES PRUEBAS EXPERIMENTALES.	127
FIGURA 127. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 25/75. LLENADO CONTINUO. SÉMOLA-SÉMOLA.	127
FIGURA 128. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 50/50. LLENADO CONTINUO. SÉMOLA-SÉMOLA.	128
FIGURA 129. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D HORIZONTAL 75/25. LLENADO CONTINUO. SÉMOLA-SÉMOLA.	128
FIGURA 130. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 2D VERTICAL 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	129
FIGURA 131. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LOS CARROS 2D Y 3D. CONFIGURACIÓN VERTICAL 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	130
FIGURA 132. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. 3D HORIZONTAL 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	130
FIGURA 133. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LOS CARROS 2D Y 3D. CONFIGURACION HORIZONTAL 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	131
FIGURA 134. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2H-143 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	132
FIGURA 135. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. MUESTRA 24.	132
FIGURA 136. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2H-143 50/50. SÉMOLA-SÉMOLA.	133
FIGURA 137. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. MUESTRA 13.	133
FIGURA 138. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2H-143 75/25. SÉMOLA-SÉMOLA.	134
FIGURA 139. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 1V-130 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	134
FIGURA 140. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 1V-130 50/50. SÉMOLA-SÉMOLA.	135
FIGURA 141. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 1V-130 75/25. SÉMOLA-SÉMOLA.	135
FIGURA 142. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2V-120 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	136

FIGURA 143. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2V-120 50/50. SÉMOLA-SÉMOLA.	136
FIGURA 144. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2V-120 75/25. SÉMOLA-SÉMOLA.	137
FIGURA 145. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 4V-120 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	137
FIGURA 146. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 4V-120 50/50. SÉMOLA-SÉMOLA.	138
FIGURA 147. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 4V-120 75/25. SÉMOLA-SÉMOLA.	138
FIGURA 148. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL CARRO 3D. CONFIGURACIÓN 2V-120 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	139
FIGURA 149. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LOS CARROS 2D Y 3D. CONFIGURACION 2V-120 25/75. SÉMOLA-SÉMOLA.	139
FIGURA 150. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA SIMULACION EN EDEM Y LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. CONFIGURACIÓN 2V-120 25/75. LLENADO CONTINUO. SÉMOLA-SÉMOLA.	140
FIGURA 151. ERRORES CUADRATICOS MEDIOS EN LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES “ZAPATOS”	141
FIGURA 152. ERRORES CUADRATICOS MEDIOS EN LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES “ZAPATOS”	142
FIGURA 153. FOTO DETALLE DE LAS PARTÍCULAS USADAS EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.	143
FIGURA 154. PORCENTAJE DEL INGREDIENTE MINORITARIO OBTENIDO EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES Y SIMULACIÓN CON EL CARRO 4V-120 CON UNA MEZCLA DE 25% DE PARTICULAS FINAS.	144
FIGURA 155. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 5	145
FIGURA 156. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 9.	145
FIGURA 157. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 13.	146
FIGURA 158. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 17.	146
FIGURA 159. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 20.	147
FIGURA 160. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 23.	147
FIGURA 161. FOTO DEL CARRO SIMULADO EN EL COMPRIMIDO 25.	148
FIGURA 162. CARRO ALIMENTADOR EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON LOS DIFERENTES INJERTOS COLOCADOS.	150
FIGURA 163. CARRO ALIMENTADOR EN POSICION 4V-12 CON LOS DIFERENTES INJERTOS.	152
FIGURA 164. SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON EL INJERTO 1 COLOCADO. SÉMOLA-SÉMOLA..	153
FIGURA 165. SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON EL INJERTO 2 COLOCADO. SÉMOLA-SÉMOLA..	153
FIGURA 166. SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON EL INJERTO 3 COLOCADO. SÉMOLA-SÉMOLA..	154
FIGURA 167. SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON EL INJERTO 4 COLOCADO. SÉMOLA-SÉMOLA..	154

FIGURA 168. SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON EL INJERTO 5 COLOCADO. SÉMOLA-SÉMOLA..	155
FIGURA 169. SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON EL INJERTO 6 COLOCADO. SÉMOLA-SÉMOLA..	155
FIGURA 170.SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON INJERTOS 4 Y 5 COLOCADOS. SÉMOLA-SÉMOLA.	156
FIGURA 171.SIMULACIÓN DE LA DESCARGA DEL ZAPATO EN SU CONFIGURACION 4V-120 CON CON INJERTOS 3 Y 4 COLOCADOS. SÉMOLA-SÉMOLA.	156
FIGURA 172. ERROR CUADRATICO MEDIO OBTENIDO DURANTE LA DESCARGA DEL CARRO EN SU CONFUGURACION 4V-120 CON LOS DIFERENTES INJERTOS.	157
CAPÍTULO 7.....	159
FIGURA 173. ERROR CUADRATICO MEDIO OBTENIDO DURANTE LA DESCARGA DEL CARRO LOS CARROS VERTICAL Y HORIZONTAL CONTRALOS VALORES TEORICOS DE LA MEZCLA.	162

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VALORES INICIALES DE LOS PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN.....	68
TABLA 2. VALORES INICIALES DE LOS PARÁMETROS RELATIVOS A LAS INTERACCIONES.....	68
TABLA 3. VALORES DE LOS PARÁMETROS RELATIVOS A LAS INTERACCIONES TRAS LA CALIBRACIÓN EN EL LLENADO POR CAPAS.....	116
TABLA 4. VALORES DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LAS SIMULACIONES POR CAPAS.	117
TABLA 5. VALORES DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LAS SIMULACIONES CON CARRO VERTICAL Y HORIZONTAL. LLENADO INDUSTRIAL	126
TABLA 6. VALORES DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LAS SIMULACIONES HORIZONTAL Y LLENADO CONTINUO.....	129
TABLA 7. VALORES DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LAS SIMULACIONES CON CARRO VERTICAL Y HORIZONTAL EN SU CONFIGURACIÓN 3D.....	131
TABLA 8. VALORES DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LAS SIMULACIONES CON CARRO EN CONFIGURACIÓN ZAPATO CONTRA LA PRUEBA EXPERIMENTAL.....	141
TABLA 9. VALORES DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LAS SIMULACIONES CON CARRO EN CONFIGURACIÓN ZAPATO COMPARADO CON LA MEZCLA TEÓRICA.....	142
TABLA 10. ERROR CUADRATICO MEDIO OBTENIDO DURANTE LA DESCARGA DEL CARRO EN SU CONFUGURACION 4V-120 CON LOS DIFERENTES INJERTOS.....	157

GLOSARIO Y DEFINICIONES

DEM. Método de los elementos discretos.

Coefficiente de fricción estática. El coeficiente de rozamiento o coeficiente de fricción estática expresa la oposición al movimiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto. Es un coeficiente adimensional.

El valor del coeficiente de rozamiento es característico de cada par de materiales en contacto; no es una propiedad intrínseca de un material. Depende además de muchos factores como la temperatura, el acabado de las superficies, la velocidad relativa entre las superficies, etc. La naturaleza de este tipo de fuerza está ligada a las interacciones de las partículas microscópicas de las dos superficies implicadas.

Coefficiente de restitución. Coeficiente que indica el grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas.

Coefficiente de rodadura. La resistencia a la rodadura, a veces llamada rozamiento de rodadura o arrastre rodante, es la resistencia que se produce cuando un objeto redondo rueda sobre una superficie plana, en línea recta con un movimiento de velocidad constante. Es causada principalmente por la deformación del objeto, la deformación de la superficie, o ambas cosas.

Material granular binario. Material compuesto por dos tipos diferentes de partículas.

Material granular ternario. Material compuesto por tres tipos diferentes de partículas.

Flujo de masa Es el fenómeno por el cual todas las partículas descienden de forma ordenada sin crear conductos.

Flujo de conducto Es el fenómeno por el cual unas partículas quedan inmovilizadas para dejar a otras que pasen como si de un río se tratase.

RMSE Error cuadrático medio (Root mean square error)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se muestra la aplicación del método de los elementos discretos (DEM, *Discrete Element Method*) para el estudio de los fenómenos de segregación que se producen en el depósito alimentador (carro) de una maquina compresora excéntrica.

En general, la modificación de los parámetros sobre la maquina real está muy limitada, fundamentalmente por el tiempo y el dinero que supone la adaptación de esta o de los útiles necesarios. Por ello se ha buscado una representación virtual fidedigna de todo el proceso se facilita enormemente el estudio de las posibles soluciones. Para ello se utilizara el Método de Elemento Discreto (*Discrete Element Method*, DEM), que permite estudiar el comportamiento de las partículas.

Este método de los elementos discretos está enmarcado en la familia de métodos numéricos, permite simular modelos parametrizados de sistemas granulares sólidos y materiales discontinuos. Concretamente, el software empleado ha sido EDEM® (DEM Solutions), en el que se puede implementar la geometría de los elementos a simular, o importarla de una herramienta CAD.

Con el objeto de estudiar la segregación de una mezcla binaria (2 ingredientes) producida en el interior del depósito alimentador mediante el método DEM, en primer lugar, se ha realizado un ajuste de los parámetros del modelo simulado (principalmente los coeficientes de fricción) mediante la comparación con pruebas empíricas realizadas con un depósito construido con materiales transparentes (policarbonato) de dimensiones similares a las de un carro alimentador real, para posteriormente pasar a optimizar el carro.

El fenómeno de la segregación se ve afectada por diversos factores tales como el tamaño de la partícula (Guo, Wu, Kafui & Thornton, 2011) y la densidad (Guo, Wu, Kafui & Thornton, 2009), la forma (Roskilly et al, 2010), y se rige principalmente por el efecto de las “nueces de Brasil” (Hong, Quinn, 2001).

El estudio de los procesos de segregación en los carros alimentadores de las maquinas compresoras posee gran importancia, sobre todo para la industria farmacéutica, donde la composición de cada comprimido debe estar perfectamente acotado. El modelo obtenido ha permitido identificar los mecanismos de segregación que se producen en este tipo de máquinas y ayudo a estudiar las modificaciones precisas para mitigar la segregación, sin llevar a cabo numerosas y costosas pruebas reales de laboratorio.

1.1 Objetivos

En el presente trabajo de investigación titulado “Estudio de la segregación de una mezcla granular en una máquina compresora mediante el método de los elementos discretos (DEM)”, se partió de una compresora excéntrica mono-punzón perteneciente a la Universidad de La Rioja, sobre la cual se realizaron los estudios de segregación, llegando a un prototipo de policarbonato para poder ampliar y mejorar la investigación.

En concreto, dicho prototipo está protegido por una patente de invención llamada: *Carro alimentador para maquina compresora y uso del mismo*, con número de patente ES 2 424 568 B2 .

Los objetivos principales del presente trabajo de investigación son los que se enumeran a continuación:

- Estudio de los fenómenos de segregación que se producen en una máquina de compresión directa, basado en la realización de ensayos empíricos y en simulaciones mediante el método de los elementos discretos DEM.
- Determinación de los parámetros de simulación para poder ajustar la simulación a las pruebas empíricas reales.
- Estudio de los fenómenos de segregación producidos durante el proceso de compresión.
- Validación del modelo para estudiar como minimizar el fenómeno de segregación.
- Estudio de la minimización del fenómeno de segregación durante el proceso de fabricación de los comprimidos.

1.2 Antecedentes

En fases previas de este estudio [1] y [2] se comenzó con el estudio de los fenómenos de segregación dentro del depósito de alimentación de una compresora durante el proceso de fabricación de comprimidos.

Durante estas fases previas todo el estudio se concentró en un depósito con forma de “zapato” denominado 2V-120 con una mezcla en porcentaje 15/85 (material fino/grueso). Tras todos estos estudios y en el momento que los valores de los coeficientes que ajustaban las simulaciones se intentaron exportar a otras configuraciones y/o proporciones de mezclado, estas simulaciones no eran representativas.

Basándonos en las experiencias de otros autores como Ketterhagen et al [3] se decidió replantearnos la estrategia y comenzar con simulaciones y pruebas reales más sencillas para comprender mejor los fenómenos que afectan a la segregación.

1.2.1 FASE I de los antecedentes. Simulación del carro “Real”

1.2.1.1 Materiales empleados en la fase I de los antecedentes.

1.2.1.1.1 Máquina compresora utilizada.

En esta fase del estudio, la máquina utilizada para el estudio de la segregación es una compresora excéntrica de la empresa J. Bonals que efectúa un comprimido en cada movimiento cíclico, ya que la matriz solo dispone de un alojamiento y la máquina es mono punzón.

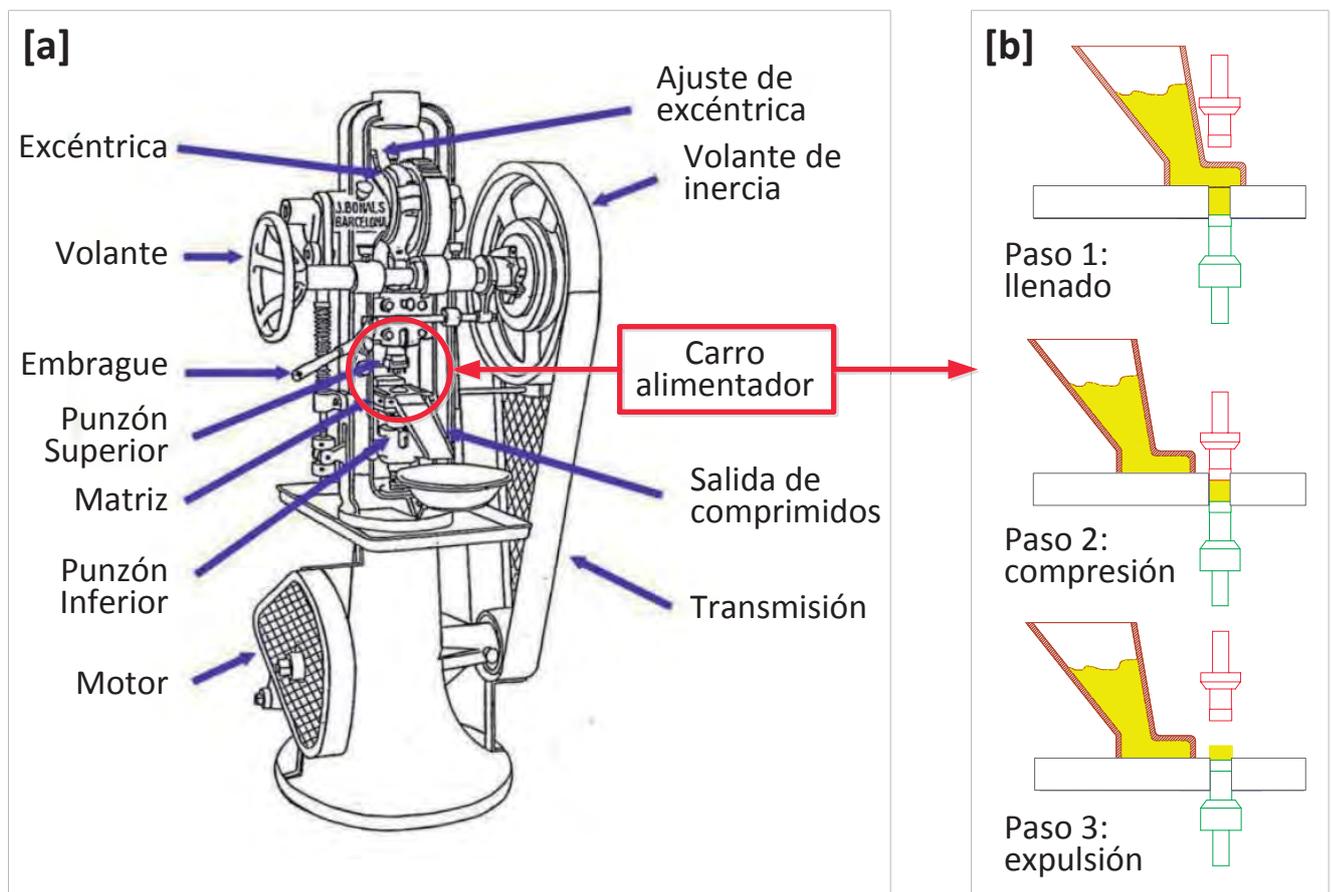


Figura 1. Esquema máquina de compresión excéntrica utilizada para la fabricación de los comprimidos.

El carro alimentador que se utilizó para la fabricación de los comprimidos posee una capacidad de un kilogramo y se desliza sobre la guía donde está ubicada la matriz, lugar en el que se fabrica el comprimido.

El proceso de fabricación de un comprimido, consta de tres pasos principales:

1. **LLENADO.** El carro alimentador se desliza hasta la parte delantera de la guía. El punzón inferior desciende para dejar que las partículas llenen el alojamiento de la matriz para la formación del comprimido. (Figura 1.b)
2. **COMPRESIÓN.** El carro se retira hacia atrás a la vez que el punzón superior desciende para comprimir las partículas que se encuentran en el alojamiento de la matriz y compactar las partículas que forman el comprimido. (Figura 1.b)
3. **EXPULSIÓN.** El punzón inferior asciende para extraer el comprimido del alojamiento de la matriz que posteriormente será empujado por el carro fuera de la guía. (Figura 1.b)

1.2.1.1.2 Ingredientes de la mezcla

La granza utilizada para la fabricación de los comprimidos en esta fase del estudio fue una mezcla de 2 ingredientes que por sus características, permiten estudiar varios de los mecanismos de segregación (diferencia de tamaños, densidades y coeficientes de fricción).

Así, los ingredientes utilizados para esta fase del estudio fueron:

- El **ingrediente Mayoritario**, I_{May} (85%) corresponde al de mayor tamaño y menor densidad.
Granza de color rojo. Cilindro de 2.1 mm de diámetro y 3.4 mm de altura.
- El **ingrediente minoritario**, I_{min} (15%) corresponde al de menor tamaño y mayor densidad.
Pasta alimenticia. Cilindro de 1.6 mm de diámetro y 1.6 mm de altura.

1.2.1.2 Simulación del proceso de compresión. Aproximación del carro "2D"

1.2.1.2.1 Carro simulado

Antes de comenzar el proceso de simulación, se llevó a cabo el diseño del depósito mediante el programa de diseño asistido Solid Edge.

Solid Edge es un programa parametrizado de ordenador de piezas tridimensionales, que permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura, funciones de dibujo en plano para ingenieros, etc.

En la siguiente figura se puede observar el diseño en Solid Edge del depósito de la máquina compresora.

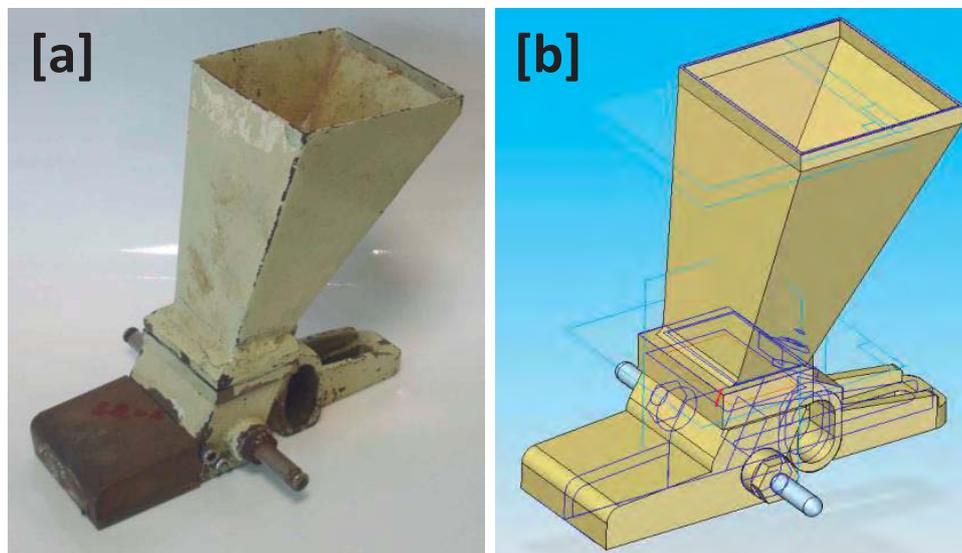


Figura 2. [a] Carro real [b] Diseño del carro "3D" de la compresora en Solid Edge

También se diseñó la guía donde está ubicada la matriz con el alojamiento para la fabricación del comprimido y sobre donde se desliza el carro con el depósito.

La exportación del diseño, al programa de simulación EDEM®, se realizó a través del programa de diseño Catia, ya que si no, el diseño no guardaba las dimensiones correctas dentro de EDEM®.

En las pruebas preliminares de simulación empleando las dimensiones reales, tanto del carro alimentador (carro "3D"), como de los ingredientes de mezcla (85-15%), se comprobó que el coste computacional era excesivo. El tiempo de cálculo necesario para simular la descarga total del carro alimentador era de 126 horas, empleando 8 núcleos en paralelo. Ante esta circunstancia, cabía la posibilidad de reducir el número

de partículas de la mezcla (aumentando su tamaño) o poniendo en práctica las experiencias de otros autores, Y.Guo [4], emplear un modelo de carro "simplificado".

En nuestro caso se optó por emplear esta última opción, reservando el modelo de carro "3D" para la validación del modelo obtenido a partir del modelo simplificado y utilizar un modelo simplificado o "2D" (Figura 3.c), que se configuró a partir de una "rebanada" de 2 cm de espesor del carro "3D" (Figura 3.b).

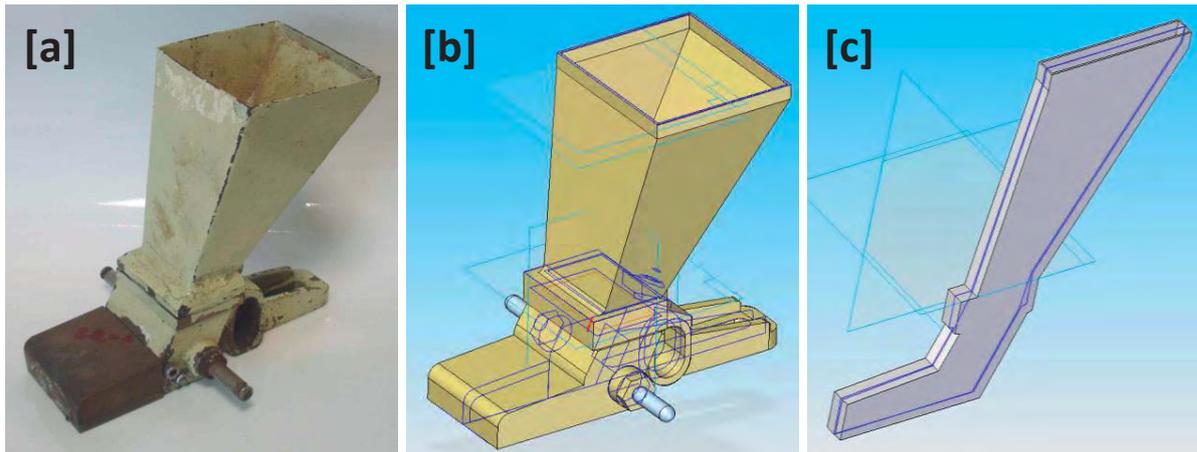


Figura 3. [a] Carro real [b] Modelado del carro "3D" de la compresora en Solid Edge y [c] Modelado del carro "2D" de la compresora en Solid Edge

1.2.1.2.2 Modelo empleado para la simulación de los ingredientes

El software EDEM® emplea partículas esféricas para la generación de los modelos de los ingredientes de la mezcla. Este programa permite la unión de varias esferas para formar las partículas a simular con la geometría deseada.

En nuestro caso basándonos en las formas de las partículas a simular, se modelaron las partículas como se observa en la siguiente foto:

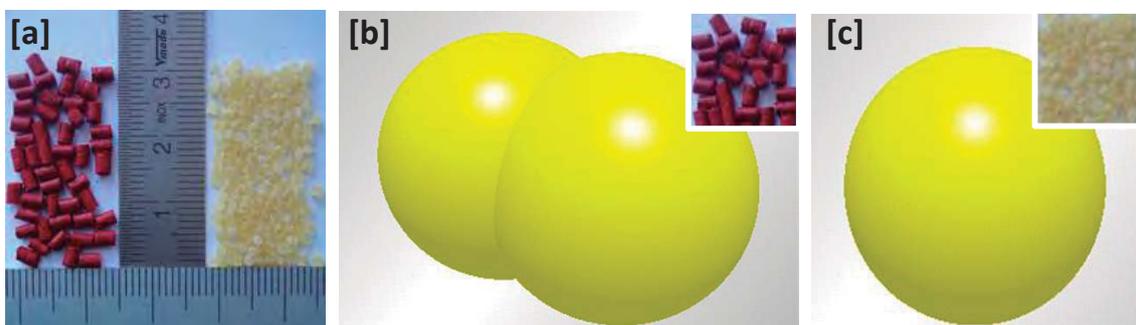


Figura 4. [a] Partículas IMay e Imin, [b] Modelo IMay, [c] Modelo Imin

1.2.1.3 Conclusión de la fase I de los antecedentes.

1.2.1.3.1 Validación del modelo 3D

Como resultado del proceso iterativo se obtuvieron los valores de las variables que permitían simular satisfactoriamente el proceso de compresión “real”, en esta fase del estudio también se pudo confirmar la validez de dichos valores, a partir de la simulación del mismo proceso de compresión, pero en este caso con el modelo de carro “3D”.

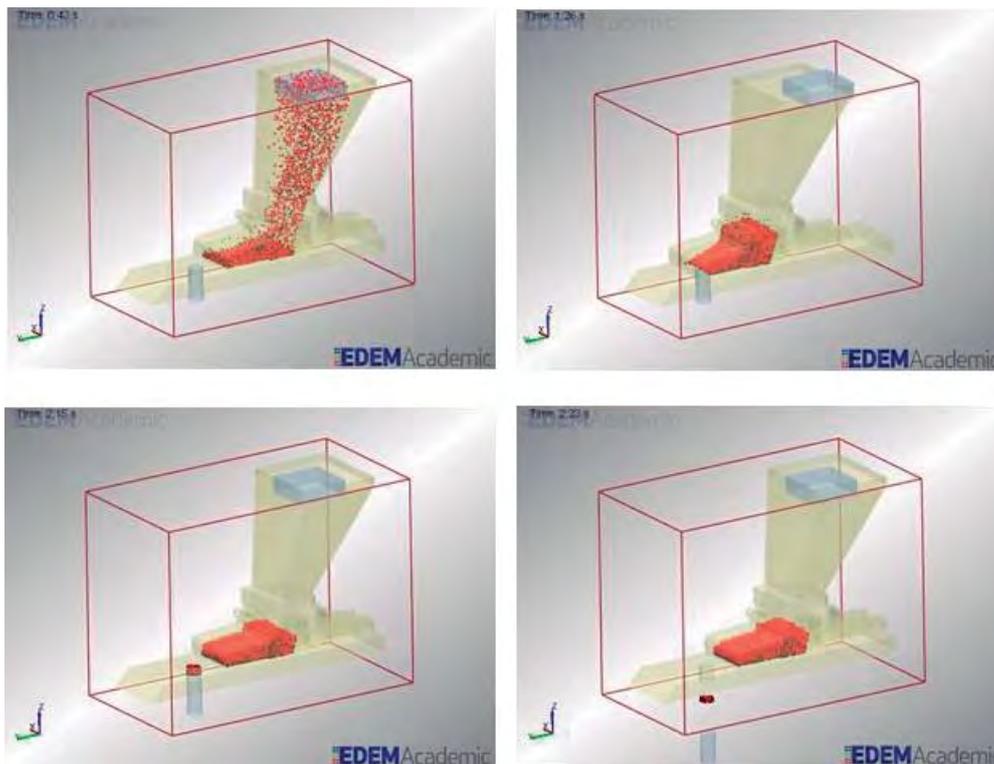


Figura 5. Ciclo de formación de un comprimido. Modelo carro “3D”

1.2.1.3.2 Zonas y mecanismos de segregación

En esta fase también se analizaron los mecanismos de segregación que se producían dentro del carro para poder mejorar y minimizar este fenómeno en futuras fases de la investigación.

Así, en primer lugar, los fenómenos de *percolación* (segregación por tamaño) y *condensación* (segregación por densidad) explicarían que las partículas I_{min} , que son más pequeñas y más densas, se concentren en la base del carro (zona S2) y, como consecuencia, las partículas I_{May} lo hagan en la zona superior del mismo (zona S3). Junto a estos fenómenos, parecen observarse también los efectos de los mecanismos de *trayectoria de segregación* (segregación por fricción) y *convección* (segregación por

vibración), debidos a la vibración producida por el movimiento horizontal alternativo del carro (F_H). Esto es, las partículas Imin ven reducida su velocidad durante el avance y retroceso del carro (segregación por fricción), lo que conduce a una acumulación de las mismas en la zona central de la base. No obstante, las partículas Imin se extienden hasta la parte trasera del carro por el efecto de los mecanismos de percolación y condensación producidos en columna del mismo, lo que explicaría la acumulación de partículas Imin en la zona S2. En cuanto a la mayor concentración de partículas IMay en la zona S1, esta podría explicarse por el fenómeno de convección, junto a la eliminación de partículas en la formación de comprimidos, que se produce en una zona de descarga del carro, que impide que las partículas Imin avancen hasta la zona delantera del carro.

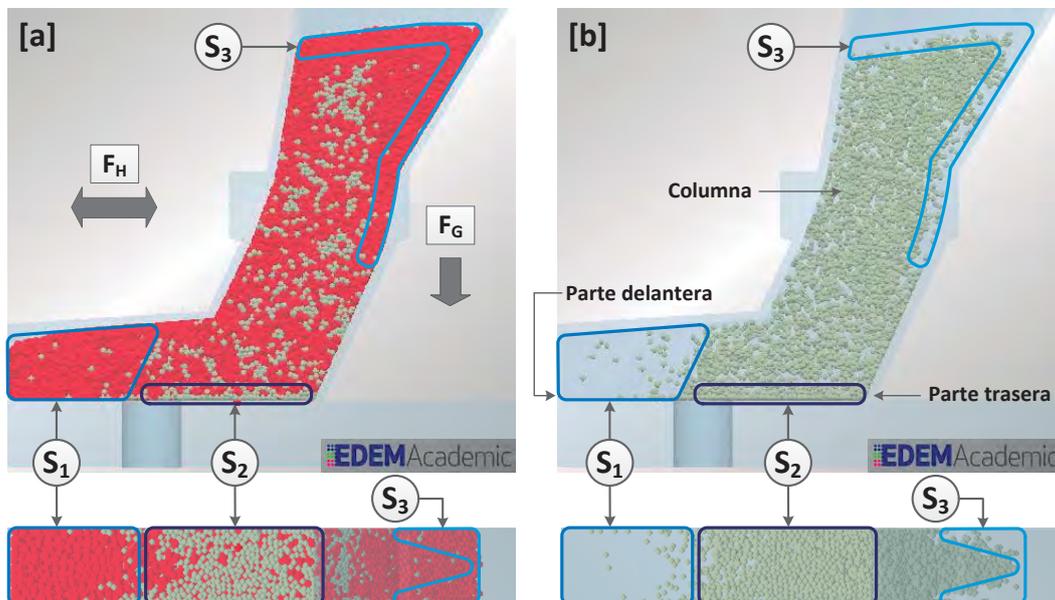


Figura 6. Zonas de segregación: [a] Mezcla Total; [b] Imin

1.2.2 FASE II de los antecedentes. Simulación del carro “Policarbonato”.

1.2.2.1 Materiales empleados en la fase II de los antecedentes

1.2.2.1.1 Máquina compresora utilizada:

Debido a la poca, o más bien nula visibilidad que teníamos dentro del carro de la máquina compresora mono-punzón, se comenzó a desarrollar un prototipo de carro compresor de policarbonato, que además de permitirnos observar que estaba ocurriendo dentro del carro, y poder explicar mejor los mecanismos de segregación, también nos permitía ensayar con carros de diferentes grosores y comprobar que nuestras simulaciones se ajustasen a la realidad.

Este “simulador” de carro está formado por 2 placas laterales, atornilladas a otras placas, frontales y traseras, formando un conjunto rígido. Las placas frontales y traseras pueden intercambiarse, de manera que el ancho del carro modificarse (Figura 7 a y b).

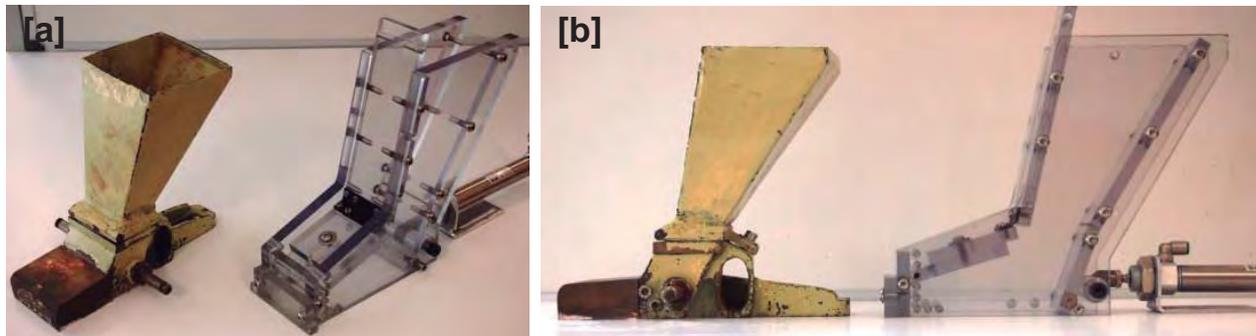


Figura 7. [a] Vista isométrica y [b] de perfil de carro convencional y carro “3D” (51 mm)

1.2.2.1.2 Ingredientes de la Mezcla

Para esta segunda fase del presente trabajo se ha empleado una mezcla binaria (2 ingredientes) que por sus características, permiten estudiar varios de los mecanismos de segregación citados anteriormente: distintos tamaños, densidades y coeficientes de fricción (Figura 8).

- El ingrediente Mayoritario, **I1 (85%** en peso) corresponde al de mayor tamaño o “**grueso**” y menor densidad: Pasta alimenticia (sémola de trigo) con una forma prácticamente esférica de 3.8 mm diámetro. Densidad: 1335 kg/cm³
- El ingrediente minoritario, **I2 (15%** en peso) corresponde al de menor tamaño o “**fino**” y mayor densidad: con una forma prácticamente esférica de 1.6 mm diámetro. Densidad: 1730 kg/cm³



Figura 8. Ingredientes I1 e I2

1.2.2.1.3 Llenado del carro

Durante los dos años que se llevaba investigando la segregación en el depósito de una maquina compresora, pudimos observar que cuanto más ajustemos las pruebas reales y las simulaciones entre ellas mejores resultados obtenemos. Esto nos llevó a tener que controlar mejor el proceso de llenado del depósito del prototipo de policarbonato.

Así, para realizar los llenados del carro, primero se preparaban las pesadas de 20 gr necesarias para llenar los diferentes espesores de carro, como se pueden observar en la Figura 9:

- Carro de 10 mm: 10 pesadas de 10gr, 100gr.
- Carro de 20 mm: 20 pesadas de 10gr, 200gr.
- Carro de 51 mm: 20 pesadas de 20gr, 400gr.



Figura 9. Pesadas de 20gr

Con las pesadas necesarias para cada tipo de carro preparadas, se procede a colocar la “tolva de llenado” con la corredera debajo, tal y como se puede ver en la Figura 10.

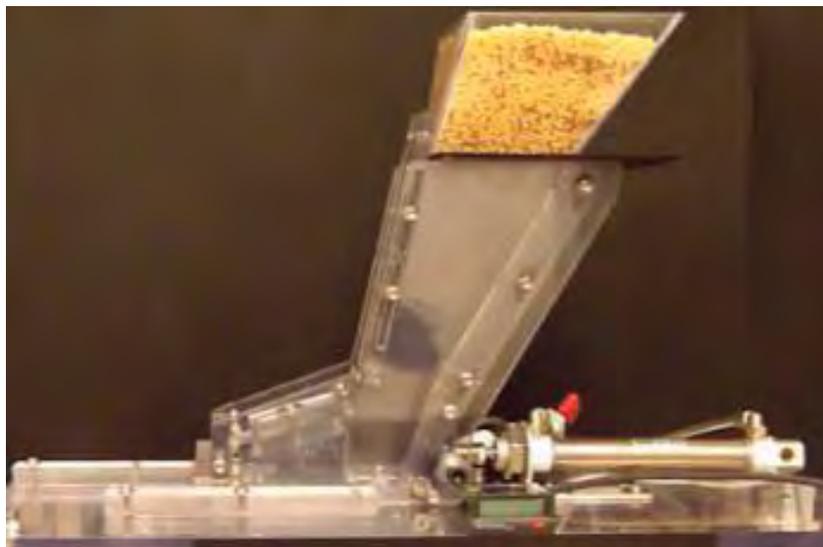


Figura 10. “Tolva de llenado” en posición de llenado.

Posteriormente se retira la corredera con un movimiento rápido y el carro queda lleno de una forma fácilmente repetible y simulable con el software DEM.

1.2.2.2 Simulación del proceso de compresión

1.2.2.2.1 Modelo empleado para la simulación del carro

Con los conocimientos adquiridos y poniendo en práctica las experiencias de otros autores Ketterhagen et al., [5] y Guo, et al, [6], se construyó, y posteriormente simuló, un modelo de carro de 10 mm de ancho interior, que simplemente se basa en el carro de 20 mm (Figura 11. [a] y [b] Carro “real” (51 mm) y simulado, [c] y [d] Carro “quasi-3D” real y simulado con una doble cara en un lateral, para dejar un ancho interior de 10 mm.

Así, después de conseguir unos coeficientes de iteración bastante ajustados con el carro de 10 mm, se pasó a utilizar el modelo 20 mm para terminar de aproximar el modelo, antes de validarlo con el modelo de 51 mm, denominado modelo “3D”.

El modelo de carro de 51 mm se utilizó posteriormente para la validación del modelo obtenido a partir del modelo quasi-3D y 10mm.

Las simulaciones del carro “3D” o carro de 51 mm (Figura 11 a y b) tenían un coste computacional de 65 horas, pero con las ventajas de usar un modelo de 20 mm con un coste computacional de 6 horas, como recomendaban otros autores ya mencionados en la Fase I, la validación fue viable.

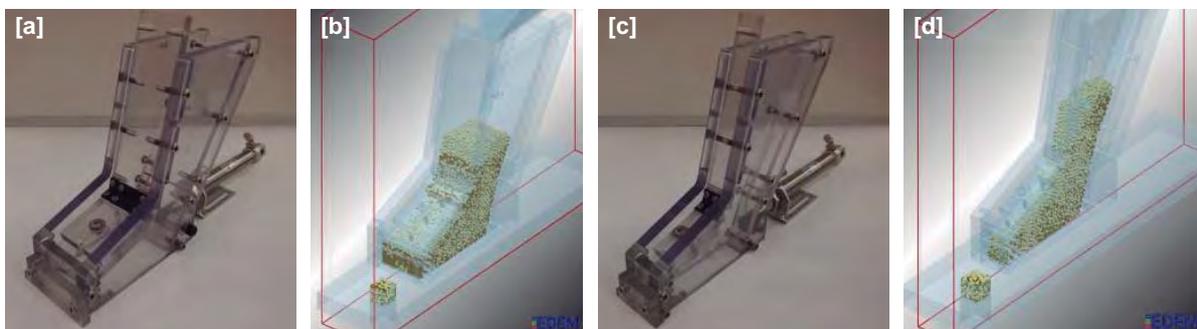


Figura 11. [a] y [b] Carro “real” (51 mm) y simulado, [c] y [d] Carro “quasi-3D” real y simulado

1.2.2.2.2 Modelo empleado para la simulación de los ingredientes de la mezcla

El software EDEM® simula las partículas reales empleando un modelo basado en partículas esféricas. Para poder considerar las irregularidades de las partículas reales, EDEM puede emplear modelos de partículas en las que se empleen varias esferas como en Martínez-Martínez et al., 2012 [2] o modificar parámetros de la simulación, como el coeficiente de rodadura (“rolling friction”), que permite reproducir las “dificultades”

para rodar (partícula-partícula y partícula pared) de las partículas no exactamente esféricas.

En esta fase, y debido a la práctica esfericidad de los ingredientes, se ha empleado este último método de aproximación.

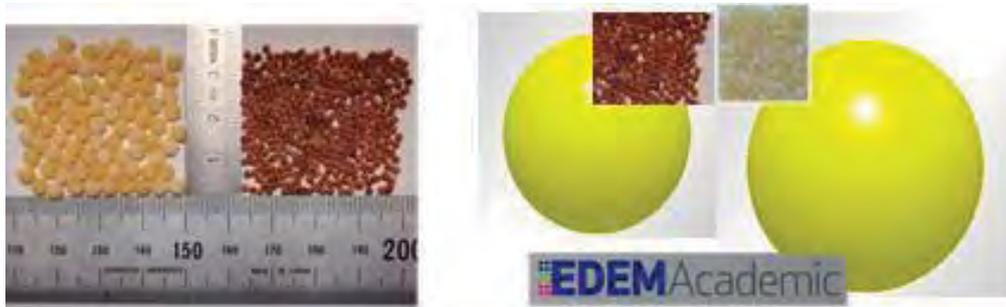


Figura 12. [a] Partículas IMay e Imin, [b] Modelo IMay, Imin

1.2.2.3 Conclusiones de la fase II de los antecedentes

1.2.2.3.1 Análisis de la segregación durante el proceso de llenado del carro “quasi-3D”

Cuando se llena el carro con la mezcla a comprimir se produce una primera segregación por la deposición de las partículas a distintas velocidades. La distinta forma en la que las partículas rebotan entre ellas y contra las paredes del carro, determinan la magnitud de la misma. Esta segregación depende de los siguientes factores: las propiedades de las partículas (densidad, tamaño, forma, etc.), los coeficientes de fricción (estático y “rolling”) y restitución, en los contactos partícula-partícula y partícula-paredes (del carro) y la geometría del propio carro (pendiente, insertos, etc.). Esta segregación hizo que las partículas finas se depositarán en un porcentaje mayor al de su proporción teórica (15%) en la base del carro.

1.2.2.3.2 Análisis de la segregación durante el proceso de vaciado del carro “quasi-3D”

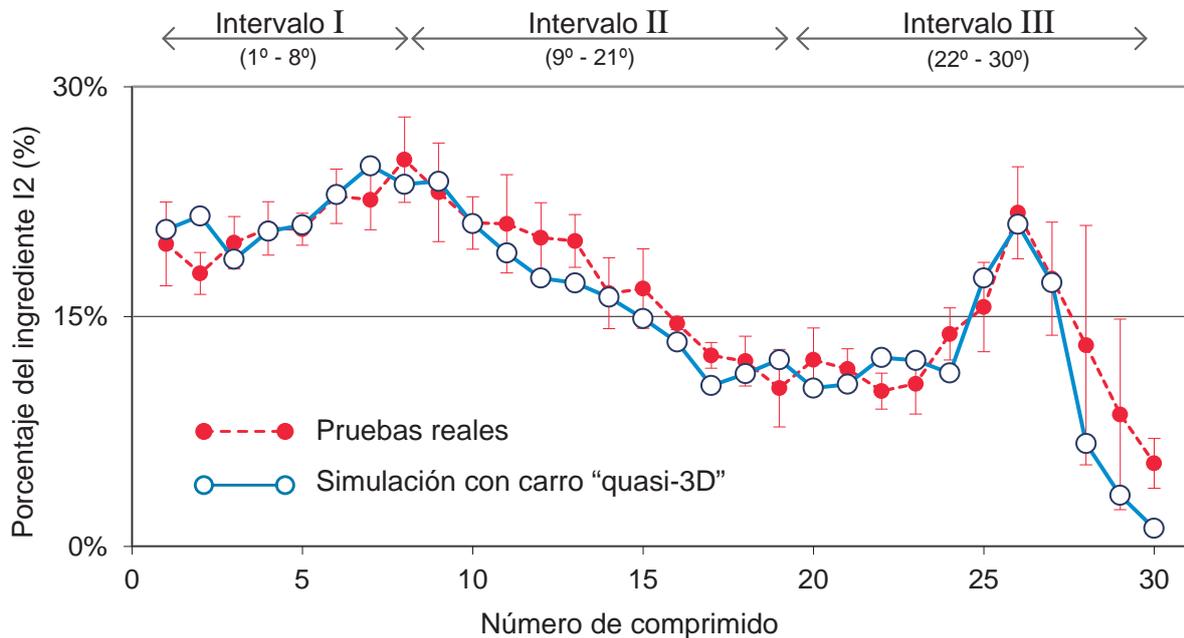


Figura 13. Porcentaje del ingrediente minoritario (15% en peso) obtenido en las pruebas reales (media obtenida de 5 pruebas con indicación del intervalo de confianza para un $\alpha = 0.05$) y en la simulación final. Ambos resultados correspondientes al carro “quasi-3D”.

Como en la anterior fase, a lo largo de un ciclo completo de ensayo (real y simulado) fue posible identificar todos los mecanismos de segregación citados en apartado 3.2.

Teniendo en cuenta la segregación identificada a lo largo del ciclo (Figura 13), los mecanismos de segregación han sido analizados en 3 intervalos de producción de comprimidos. En las Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se muestran las imágenes correspondientes a los instantes previos al llenado de la matriz (instante F100P0Tz) que producirán los comprimidos 1°, 8°, 19°, 26° y 30°, correspondientes a los 3 intervalos identificados. En la Figura 14a, se definen las zonas (I, II, III y IV) en las que se ha dividido el contenido del carro y que permiten explicar con mayor claridad los mecanismos de segregación que se producen a lo largo del ciclo completo. Para cada comprimido se presentan las imágenes de perfil de la prueba real (en el que se observa que el contador muestra un número correspondiente al comprimido anterior, $z-1$), de la simulación y, para facilitar la comprensión de los mecanismos de segregación, una imagen de detalle de la simulación en la que únicamente se muestran las partículas del ingrediente I2 (ingrediente de menor tamaño o fino).

Intervalo I (del comprimido N°1 al N°8): Las partículas más pequeñas o finos (I2) van rellendo los huecos que existen entre las partículas más grandes o gruesos (I1) haciendo que éstas partículas vayan desplazándose hacia abajo y acumulándose en la base del carro. Esta segregación por percolación (por diferencia de tamaño) va aumentando hasta que en el comprimido N°8 alcanza un porcentaje de finos del 24%. En la imagen de detalle (en la que únicamente se muestran los finos) de la Figura 14 e, se aprecia cómo han desaparecido parte de los finos de las zonas III y IV (de la punta del carro) lo que se ha traducido en un aumento de su porcentaje en los comprimidos producidos en este intervalo.

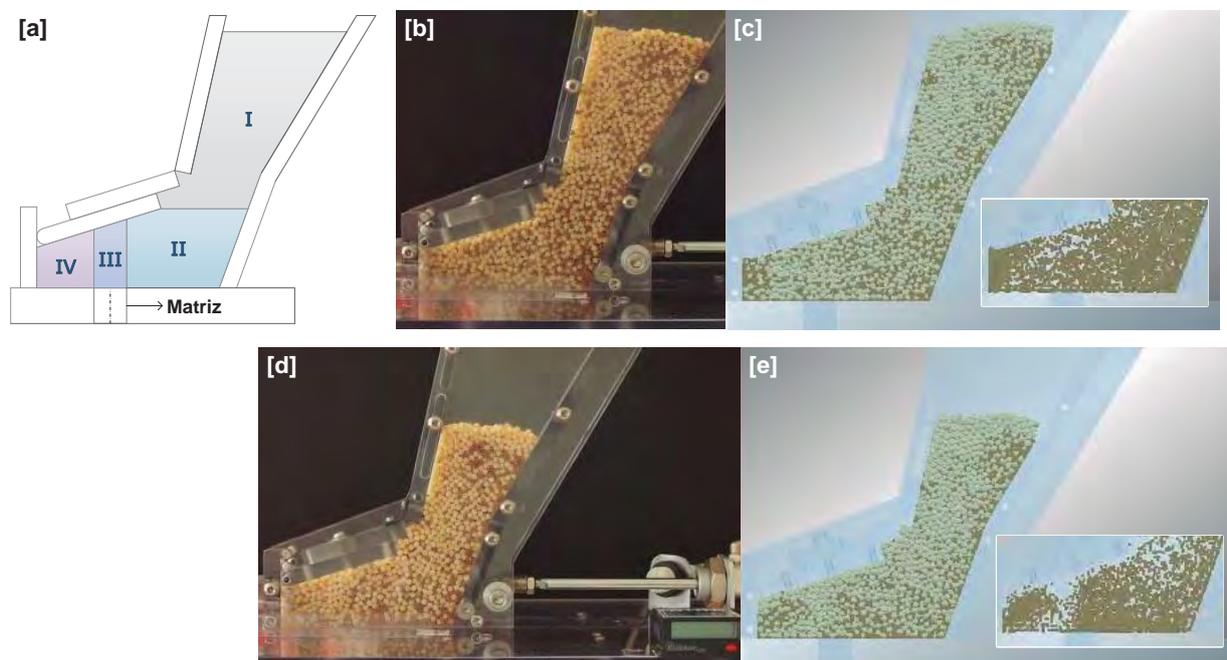


Figura 14. Divisiones del contenido del carro e imágenes reales y simuladas de los comprimidos 1 y 8

Intervalo II (del comprimido N°9 al N°21): Los mecanismos de segregación identificados en el intervalo I siguen produciéndose, pero al ir agotándose los finos, el porcentaje de éstos disminuye desde el 23.9% del comprimido N°9 hasta el 10.6% del comprimido N°21 (Figura 13). En la imagen de detalle de la Figura 15b se aprecia cómo se ha ido acentuando la desaparición de los finos de las zonas III y IV pero, al contrario de lo que ocurrió en el intervalo I, no se ha traducido en un aumento del porcentaje de éstos, pues también se han “consumido” los finos de las partes superiores de estas zonas. También se aprecia en las imágenes (real y simulada) la disminución de finos de la parte superior de la zona I.

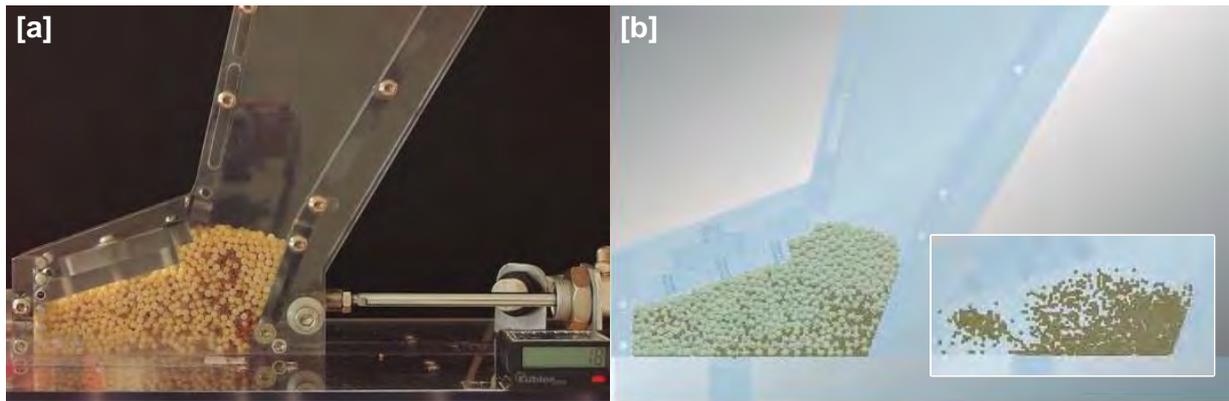


Figura 15. Imágenes reales y simuladas del comprimido 19.

Intervalo III (del comprimido N°22 al N°30): Durante los intervalos I y II, el principal fenómeno de segregación estaba relacionado con la percolación de finos (desplazamientos verticales en el sentido de la gravedad). El movimiento de las partículas estaba muy limitado por la geometría del carro y los desplazamientos en sentido horizontal, debido al movimiento alternativo del carro, eran prácticamente inexistentes. A partir del comprimido N°22, habiéndose consumido las partículas de la zona I, la mezcla comienza a disponer de espacio para desplazarse horizontalmente en el interior del carro debido a la fuerza de inercia que le confiere éste en su movimiento alternativo. A partir de este momento comienza a producirse mecanismo de segregación por convección (o vibración). A medida que aumenta el espacio libre en la base del carro, las partículas se desplazan horizontalmente entre las zonas II, III y IV. Este desplazamiento (además del mantenimiento de la percolación identificada en los intervalos anteriores) explica el aumento repentino del porcentaje de finos que se produce en el comprimido N°26 (21.0%). En la imagen de detalle de la Figura 16b, se observa cómo las partículas gruesas que provienen de la zona I (libres de finos), ocupan la mitad derecha de la zona II. Este hecho, y la práctica desaparición de los finos de las zonas III y IV, hace que se genere una “bolsa de finos” que se desplaza horizontalmente por la mitad izquierda de la zona II (imagen de detalle de Figura 16d). Esta bolsa de finos se “consume” en la producción de los comprimidos N°25, 26 y 27 (Figura 13) cuando ésta se posiciona en la zona III, justo encima de la matriz.

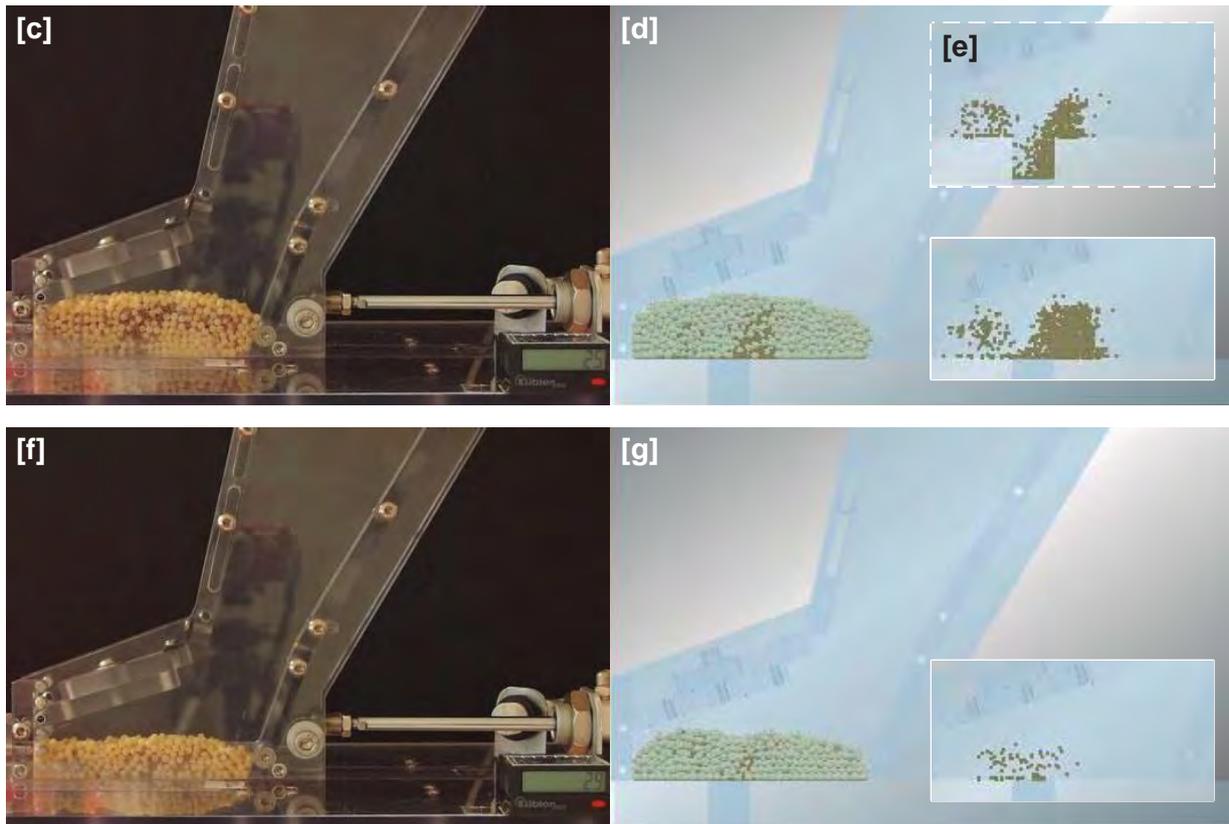


Figura 16. Imágenes reales y simuladas de los comprimidos 26 y 30.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Materiales granulares

La materia granular es aquella que está formada por un conjunto de partículas macroscópicas sólidas lo suficientemente grandes para que la única fuerza de interacción entre ellas sea la de fricción. Colectivamente, este tipo de materia presenta propiedades que pueden semejar, dependiendo del tipo de fuerzas a las que esté sometida, a las del estado sólido, el estado líquido o un gas. Una característica importante es que la materia granular tiende a disipar rápidamente la energía de sus partículas debido a la fuerza de fricción. Esto da lugar a fenómenos de gran importancia como las avalanchas, los atascamientos en descargas de silos, la segregación, etc. Como ejemplos de materia granular se encuentran los granos y semillas, la nieve, la arena, etc.

Aunque la materia granular es conocida desde la antigüedad, la aparición de fenómenos que aparentan ir en contra de la intuición, como el efecto de las nueces del Brasil (tendencia de las partículas de mayor tamaño de una sustancia granular a ascender a la superficie de la mezcla cuando esta es agitada, ha hecho que en los últimos años se haya incrementado su estudio por parte de los físicos.

El estudio de la materia granular inició desde los tiempos antiguos, a pesar de no haber recibido la misma atención que otras áreas de la física. El registro más antiguo que se tiene acerca de este tema proviene del poeta romano Lucrecio. Alrededor del año 55 a. C. escribió:

«Uno puede recoger semillas de amapola con una cuchara con la misma facilidad que si se tratara de agua y, al inclinar la cuchara, éstas fluyen de forma continua».

En el renacimiento, Leonardo da Vinci realizó experimentos que demostraban las leyes de la fricción en seco.

Hacia finales del siglo XIX Osborne Reynolds [7] realizó importantes descubrimientos que contribuyeron al estudio de la materia granular. A partir de ese momento, durante el transcurso del siglo XX y hasta la fecha el número de científicos dedicados al estudio de la materia granular ha ido en aumento.

2.2 Proceso de segregación. Efecto de las nueces de Brasil.

Un efecto de suma importancia en la materia granular es la segregación granular. Cuando una mezcla polidispersa de granos es sacudida verticalmente, las partículas se separan por tamaños, quedando las de mayor tamaño en la parte superior y las de menor tamaño en la parte inferior. Esto ocurre incluso si las de mayor tamaño tienen mayor masa que las pequeñas. Lo anterior parece desafiar los principios físicos; se esperaría que las partículas con mayor masa descendieran, mientras que las de menor masa permanecieran en la parte superior, reduciendo así la energía potencial. Este fenómeno fue bautizado como efecto de las nueces del Brasil debido a que en una mezcla de nueces, las nueces del Brasil suelen ser las de mayor masa y, por lo tanto, aparecen siempre en la superficie de la mezcla después de que ésta ha sido sacudida.

Varios autores se han dedicado a la explicación de este fenómeno. La primera explicación, dada por Anthony Rosato [8], el cual, sostenía que el ascenso de las partículas grandes se debía a la infiltración de partículas pequeñas debajo de ésta. En el momento en el que el sistema se mueve hacia arriba, la partícula grande genera un hueco debajo de ella que es ocupado por las pequeñas. Al cambiar de dirección el movimiento del sistema, los granos que recién ocuparon este espacio impiden a la partícula mayor descender. Esto genera un movimiento neto hacia arriba. Otros autores propusieron que la segregación granular era debida a la convección, la cual arrastra a la partícula grande hacia arriba. Debido a su tamaño, esta última no puede descender como lo harían las pequeñas ya que el flujo hacia abajo se realiza por solamente por un espacio muy delgado cercano a las paredes .

Mathias Möbius [9] y colaboradores de la Universidad de Chicago demostraron que el tiempo de ascenso depende de la densidad de las partículas de mayor tamaño. Cuando estas últimas tienen una densidad similar a la de los granos menores, el tiempo que les toma llegar a la superficie es mayor. Este tiempo se reduce si su densidad se incrementa o disminuye con respecto a la densidad de los granos pequeños. Este hecho le dio un giro completo al problema: la convección y la infiltración eran insuficientes para explicar la segregación granular. A partir de esto se propusieron modelos basados en la inercia de las partículas: Aquellos granos con mayor masa, tendrían mayor energía cinética y, como consecuencia, podría realizar más trabajo en contra de la fricción del granulado, penetrando una longitud mayor. Para aquellas partículas con mayores densidades se podía explicar el fenómeno como debido simplemente a una fuerza de flotación.

Una nueva complicación surgió al descubrirse que, si se colocaba una mezcla granular al vacío, el tiempo de ascenso de las partículas mayores se convertía en el mismo para todas. Conforme se reduce la presión de aire en el granulado, la diferencia entre los

tiempos de ascenso se reduce, hasta volverse iguales en el vacío. A partir de ello se sugirió que el gradiente de presiones dentro del medio granular jugaba un rol importante en el fenómeno de la segregación Möbius [10]. Para poder describir correctamente esta última es necesario tomar en cuenta todas las variables descritas por los diferentes autores Möbius [11].

En ciertas circunstancias se puede tener un efecto de las nueces del Brasil inverso. En este caso las partículas de mayor tamaño se precipitan al fondo del recipiente. Este efecto fue predicho primeramente a través de simulaciones en ordenador Sin embargo, algunos autores ponían en duda su existencia debido a la falta de evidencia experimental [12] hasta que finalmente se pudo confirmar de forma definitiva [13] El efecto de las nueces del Brasil inverso suele suceder cuando se introduce una partícula de mayor tamaño, pero menor densidad a una profundidad muy cercana al fondo del recipiente. Este fenómeno se ha podido explicar, al igual que el efecto convencional, con un gradiente de presiones

En la actualidad, este fenómeno sigue siendo el centro de muchas investigaciones como la de Liao et al [14] en 2010, donde se estudiaron el efecto de las nueces de Brasil producido en un material binario en presencia de un líquido. Los ensayos realizados para tal fin consisten en introducir en un recipiente la mezcla binaria totalmente segregada (de manera que las partículas de mayor tamaño se sitúan en la parte inferior y las de menor tamaño en la parte superior) y someter dicho recipiente a una vibración. Para ello, se emplean distintos líquidos con diferentes viscosidades y se introducen diversas cantidades de líquido en diferentes ensayos. De este modo, se estudia, por un lado cómo afecta la viscosidad a la segregación de la mezcla y, por otro, como influye la mayor o menor presencia de líquido.

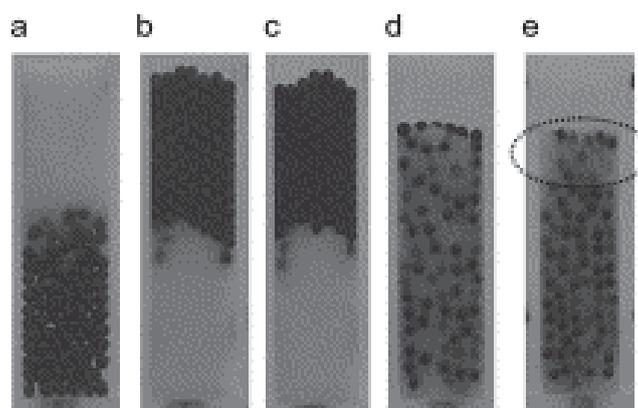


Figura 17. Evolución temporal de los ensayos realizados por Liao [13].

En un primer análisis, se controla la evolución de la mezcla a lo largo del tiempo. Se observa que, en líquidos con baja viscosidad, la cantidad de líquido introducida no

tiene gran influencia sobre la mezcla. Sin embargo, en líquidos más viscosos, se aprecia mayor velocidad de mezcla en los ensayos que incorporan menores cantidades de líquido. Del mismo modo, empleando la misma cantidad de líquido, el tiempo requerido para completar la mezcla es superior en los ensayos donde la viscosidad es mayor.

Como conclusión, se observa la altura alcanzada por las partículas de mayor tamaño al finalizar los diferentes ensayos. De nuevo, se observa que el efecto de las nueces de Brasil es menor en configuraciones que contienen más líquido o en las que la viscosidad del líquido es superior. Manteniendo la viscosidad constante, la altura de las partículas gruesas disminuye conforme se aumenta la cantidad de líquido. Del mismo modo, manteniendo constante la cantidad de líquido, la altura alcanzada por las partículas de mayor tamaño disminuye conforme aumenta la viscosidad.

En 2013 Yang [15], centró su estudio el efecto de las nueces de Brasil en un medio granular cohesivo. Para ello, se introduce en el fondo de un depósito lleno de material granular una esfera de tamaño considerablemente mayor cuya densidad es similar a la del material granular y se hace vibrar el depósito.

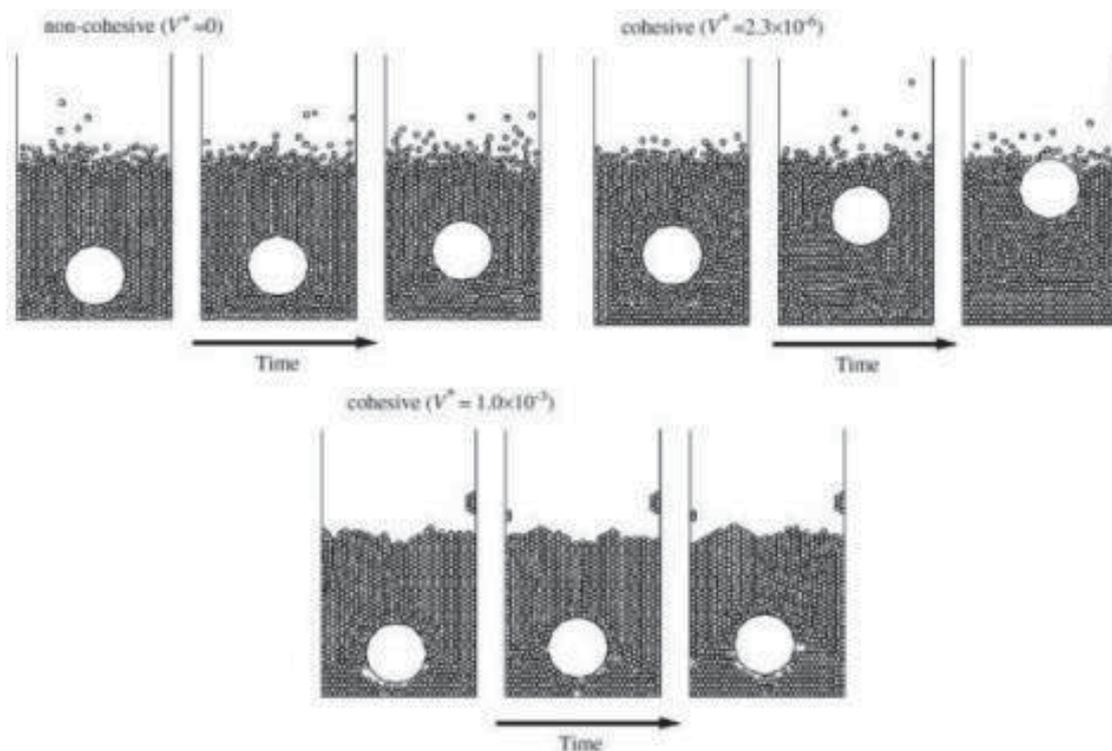


Figura 18. Evolución temporal del efecto de las nueces de Brasil en función de la cohesión [15].

Para analizar la influencia que ejerce la cohesión, se realizan ensayos con diferentes cantidades de líquido. Se observa que, con una pequeña cantidad de líquido, la esfera asciende hasta la superficie en menos tiempo que en ausencia de líquido o con gran cantidad del mismo. Esto es debido a que, en pequeña porción, el líquido actúa como lubricante, de manera que se reducen los rozamientos entre partículas y la velocidad de las mismas es mayor. Sin embargo, cuando existe demasiado líquido, las fuerzas viscosas entre partículas adquieren importancia y se reduce la velocidad de las mismas.

En dicho estudio, además, se analiza la influencia de la intensidad y frecuencia de la vibración en la velocidad de subida de la esfera. Para ello, se realizan varios ensayos con diferentes aceleraciones. Se observa que cuanto mayor es la intensidad y la frecuencia de la vibración, mayor es la velocidad de subida de la esfera.

Otro factor a analizar es la velocidad de subida en función la relación entre el diámetro de la esfera y el de las partículas y se llega a la conclusión de que cuanto mayor es esa relación, mayor es la velocidad de subida.

2.3 DEM

El método de los elementos discretos simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas las cuales interactúan entre sí, a través de sus puntos de contacto. La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es aleatoria, por lo que se puede formar medios con diferentes tamaños de partículas distribuidos a lo largo del conjunto, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analiza y se simula mediante esta técnica numérica.

Principalmente se pueden distinguir las siguientes propiedades básicas que definen de forma global y a grandes rasgos este método de análisis numérico:

- Las partículas: Elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas.
- Estos elementos distintos como también se le conoce se desplazan independientemente uno de otros e interactúan entre sí en las zonas de contacto.
- En este método a nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí.

La novedad científica que supuso la formulación del método DEM (Discrete element method o Método de los elementos discretos) a principios de los 70 así como la gran

capacidad de cálculo que requiere su implementación son los responsables de la escasez de experiencias previas y de las dificultades a la hora de aplicarlo a casos prácticos.

El modelo DEM fue formulado por Cundall [16] en los años 1971-1974 con el objetivo de simular de forma numérica el comportamiento mecánico de un medio discretizado a partir de un conjunto de elementos que componen su totalidad. Los elementos utilizados con dicho fin son considerados cuerpos rígidos, sin capacidad de deformación, siendo la deformación global del conjunto la que tiene lugar en los espacios libres entre partículas.

La formulación del método está principalmente basada en dos leyes fundamentales de la mecánica clásica. La ley fuerza-desplazamiento que relaciona ambas variables mediante una rigidez y la segunda ley de Newton que permite establecer la relación entre fuerza y aceleración.

A partir de estas dos leyes fundamentales se desarrolla toda la formulación del método. Cundall utiliza esta formulación, para simulaciones en 2D, mediante la utilización de primas. En ellas define un ciclo de cálculo a partir del cual obtienen los desplazamientos y fuerzas en el sistema.

Con posterioridad a Cundall muchos han sido los investigadores que han desarrollado técnicas de análisis mediante el DEM. Entre ellos destacan Serrano & Rodríguez-Ortiz [17] en el año 1973 y Rodríguez-Ortiz [18] en el 1974 cuyas investigaciones fueron orientadas hacia el desarrollo de un modelo numérico de análisis basado en la discretización mediante conjuntos de discos y esferas.

Siguiendo sus propias líneas de investigación, Cundall continuó con el estudio y desarrollo de aplicaciones del método de los elementos discretos (DEM) para la solución de diferentes problemas de ingeniería centrándose principalmente en el estudio de medios granulares. La simulación numérica del comportamiento de este tipo de materiales es de gran interés y constituye un problema no fácilmente resoluble mediante las técnicas de análisis numérico de la época. Para ello, Cundall [19], desarrolló un modelo numérico para describir el comportamiento mecánico de cuerpos discretizados a partir de conjuntos de discos y esferas. La utilización de elementos discretos con geometría esférica también había sido empleada con anterioridad por Rodríguez-Ortiz [17] [18].

La característica principal del modelo propuesto por Cundall [19] radica en la utilización de un esquema de integración explícito en el tiempo que proporciona una buena eficiencia computacional. También es importante destacar que en este segundo modelo, Cundall utiliza dos leyes básicas de la mecánica clásica como son la ley fuerza

desplazamiento y la segunda ley de Newton como ya lo hiciera en la formulación original del método. Asimismo, este nuevo modelo, tiene en cuenta el comportamiento viscoso del medio pudiendo utilizarse para la resolución de una amplia gama de problemas tanto elásticos como viscoelásticos.

La discretización de problemas en dos dimensiones es el principio de la modelización mediante DEM. Una vez realizados ensayos en dos dimensiones, el desarrollo de los conocimientos obtenidos permite dar un paso más en la evolución del método posibilitando la resolución de problemas en tres dimensiones.

El paso de dos a tres dimensiones comporta un fuerte incremento del coste computacional de la resolución del problema elemento, que dificulta enormemente la aplicación del método para este tipo de problemas.

Entre los estudios realizados con elementos discretos esféricos (3D) se encuentran los de Cundall [20]. En dichos estudios el objetivo principal se centra en la simulación de cuerpos formados por esferas compactas. El objetivo principal de dichos experimentos numéricos es el estudio de medios en tres dimensiones. Los resultados obtenidos mediante la simulación, se comparan con los experimentos físicos descritos por Ishiboschi & Chen [21], y con los resultados teóricos que se deben obtener de Jenkins [22]. Cundall [20] realizó básicamente dos tipos de ensayos tridimensionales. Por una parte utiliza un modelo de contacto lineal entre partículas representado por las correspondientes rigideces y por otra parte un modelo de contacto no lineal entre partículas. El modelo de contacto no-lineal, se formula de acuerdo con la teoría de Herz descrita por Mindlin [23].

Los resultados obtenidos por Cundall, son en general bastante buenos desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo, excepto en el caso de los resultados que se obtienen para la deformación volumétrica en el ensayo triaxial, donde existen diferencias considerables entre los resultados obtenidos mediante la simulación numérica y los que teóricamente se debían obtener de acuerdo con las teorías clásicas y soluciones analíticas que pueden encontrarse en la literatura.

La modelización de materiales granulares así como el estudio de problemas mecánicos que involucran dicho tipo de materiales, se realiza cada vez con más frecuencia con la técnica de los elementos discretos. Asimismo, se aplica dicha teoría para problemas lineales como para problemas no lineales. La posibilidad de poder analizar problemas no lineales, hace que dicha técnica de análisis sea una herramienta muy potente a la hora de abordar una gran diversidad de problemas.

Asimismo también se abre todo un campo de futuras líneas de investigación para poder añadir al modelo otros componentes que describan no sólo el comportamiento del

medio granular sino también la interacción de éste con otros medios, tal y como puede ser por ejemplo el agua.

El modelo propuesto por Gethin et al [24] constituye un paso más en la evolución del proceso de simulación mediante la combinación de elementos discretos y elementos finitos.

La combinación de estas dos técnicas permite abordar problemas que actualmente están todavía por resolver y se propone como una idealización de una nueva técnica numérica que toma los puntos fuertes de cada método y los agrupa en uno sólo.

El objetivo es la descripción de un modelo bidimensional en el que se combinan elementos discretos y elementos finitos. La discretización de las partículas se realiza mediante la técnica de los elementos finitos, mientras que la modelización de los contactos entre cada partícula se hace utilizando la técnica de los elementos discretos.

La principal novedad que comporta esta nueva técnica es que las partículas dejan de ser cuerpos rígidos como sucedía con la formulación inicial de Cundall[15] [19]. Por lo tanto se puede describir el comportamiento mecánico, permitiendo la deformación de las partículas sólidas, aproximándolo más a la realidad física en la que sí tiene lugar dicha deformación de las partículas.

El análisis Gethin et al, pretende demostrar la validez de esta técnica, y para ello, hace una comparativa con el modelo de Gurson [25] el cual es propuesto para el análisis de medios continuos.

La principal ventaja de la combinación de elementos discretos y elementos finitos radica en la posibilidad que ofrecen estos últimos en cuanto a la deformación de las partículas se refiere; todo ello, permite representar un comportamiento más próximo a la realidad de los medios de naturaleza granular.

2.4 La influencia de los parámetros de simulación

La importancia de los parámetros de interacción y característicos de los materiales en el método de los elementos discretos (DEM) es primordial y no siempre fácil de obtener, algunos autores como Williams et al [26], Bharadwaj et al [27]; Kruggel-Emden et al [28]; Ketterhagen et al [29]; Kodam et al [30]; promulgaron que los parámetros de contacto y característicos de cada material son necesarios para la predicción precisa de las fuerzas de contacto.

Algunos de los coeficientes estudiados son el coeficiente de resistencia a la rodadura (CoRR), que como su nombre indica, define la relación entre la fuerza que se opone movimiento de balanceo a la fuerza normal que actúa entre dos materiales en contacto.

Esta fricción o resistencia a la rodadura, para cuerpos esféricos o cilíndricos se ha atribuido a la pérdida de histéresis estudiado por Tabor [31], especialmente se da en los casos en que los materiales son deformables, como el caucho.

Sin embargo, en muchos modelos DEM, los materiales de modelado no son necesariamente "suaves", pero una resistencia a la rodadura se incluye, para ayudar a explicar la resistencia a la rodadura debido a las partículas ligeramente esférica, Ketterhagen et al [32].

El par debido a la resistencia a la rodadura M_R se ha incluido en los modelos DEM a través de varios métodos como Beer & Johnson [33]; Brilliantov & Pöschel [34]; Iwashita & Oda [35] y Zhou et al [36]

La inclusión de la resistencia a la rodadura se ha demostrado que es importante en Zhou et al [37]; Estrada et al [38] y Ji et al [39], pero hay una base teórica muy limitada, ya que la predicción de estos valores se debe medir experimentalmente.

Aun así, algunos valores se pueden encontrar en la literatura para materiales comunes, como los valores del coeficiente de restitución en Foerster et al [40]; Gorham & Kharaz [41], el coeficiente de fricción por deslizamiento Tomlinson [42]; Beare & Bowden [43] y los valores CORR Beer & Johnson [33]; Kudrolli et al [44]; Williams [45] y ASTM [46]; pero, aparte de algunas excepciones como Hancock et al [47], casi no hay datos disponibles para los demás materiales.

2.5 Segregación producida durante la descarga de depósitos

Hay muchas investigaciones que han centrado sus estudios en la segregación que se produce durante la descarga de un depósito. Un ejemplo de esos estudios son los realizados por Ketterhagen a lo largo de su trayectoria investigadora.

En esos estudios se han analizado diferentes características que pueden afectar al flujo de descarga y a la segregación que se produce, como pueden ser la forma de la tolva que fue analizada en 2007 por Ketterhagen et al [3]. En este estudio se analizó la segregación de una mezcla binaria que se produce durante el vaciado de una tolva cilíndrica atendiendo a diferentes factores como son la proporción del material fino, la relación de granulometría de los dos materiales, la forma de la tolva o el método empleado para llenar la tolva.

Más adelante, en 2008 Ketterhagen et al [5], empleando el modelo de elementos discretos validado en el estudio anterior, analizan la segregación producida durante la descarga de una tolva en forma de cuña.

En este estudio también, se estudió el efecto que ejercen sobre la segregación las propiedades de las partículas, los coeficientes de fricción, la forma de la tolva, la relación entre el tamaño de las partículas y el tamaño del orificio de salida de la tolva y el método de llenado.

Algunos de estos factores como la relación entre los diámetros de las partículas gruesas y finas reducen la segregación. Del mismo modo, la segregación disminuye conforme se aumenta el porcentaje de material fino. Sin embargo, no se observan efectos sobre la segregación debidos a la diferencia de densidades del material fino y del grueso.

Por otra parte, se observa que, cuanto mayor es la pendiente de las paredes de la tolva, se produce menos segregación. También se reduce la segregación producida mediante el aumento de relación entre el tamaño del orificio de salida de la tolva y el diámetro de las partículas gruesas.

El nivel de llenado de la tolva también influye en la segregación, que se minimiza con grandes alturas de material, siendo la opción óptima mantener un elevado nivel durante todo el proceso de descarga. Se comprueba que en tolvas de pequeña altura y gran anchura se produce mayor grado de segregación que en tolvas altas y estrechas. Se observa que se produce una segregación similar en tolvas de distintos tamaños en las que la relación altura/anchura se mantiene constante.

En relación a los coeficientes de fricción, se mostró que conforme se reduce el coeficiente de fricción entre las partículas y la pared de la tolva, se reduce también la segregación producida. Lo mismo ocurre con el coeficiente de fricción entre partículas: cuanto mayor es éste, mayor es la segregación. Este efecto se ve amplificado cuando las paredes están inclinadas. Sin embargo, el coeficiente de rodadura no afecta a la segregación.

Además, analizando los métodos de llenado descritos en [2], se observó cómo afecta enormemente la homogeneidad obtenida tras el llenado de la tolva. Del mismo modo, se observa que el coeficiente de restitución no afecta a la segregación durante la descarga del material, pero sí durante el llenado. Tampoco afecta a los métodos de llenado "por capas" y "bien mezclado", ya que las partículas se depositan desde alturas muy próximas al fondo. Sin embargo, es particularmente interesante en el "llenado industrial mediante tolva", donde se observa que un menor coeficiente de restitución produce mayor grado de segregación.

Posteriormente, en 2010 Ketterhagen et al [48] publicaron otro artículo donde se analiza mediante DEM la diferencia entre los flujos de descarga de dos depósitos (uno con la salida concéntrica y otro con la salida excéntrica) de una máquina compresora

rotativa, así como los patrones de flujo y la segregación producida en cada uno de ellos. También, se estudia la influencia del ángulo de inclinación de las paredes de cada uno de ellos.

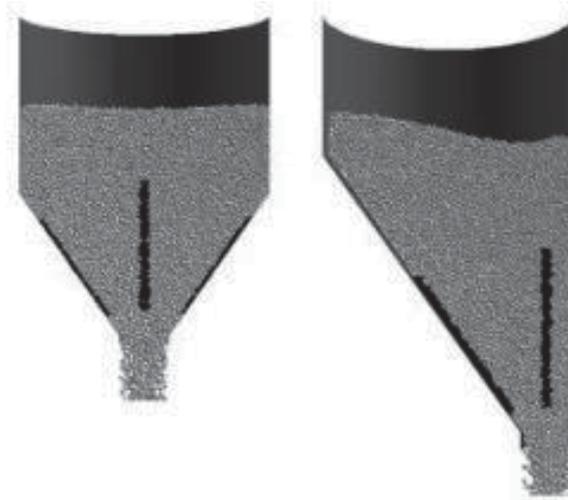


Figura 19. Depósitos concéntricos y excéntricos analizados en [48].

Se observa que el flujo de descarga en los depósitos excéntricos es mayor que en los depósitos concéntricos, independientemente de la inclinación de las paredes. Esto es debido a que la pared vertical reduce la resistencia del material.

En cuanto a los patrones de flujo, se observa que, para depósitos con paredes de gran pendiente y bajo rozamiento con las partículas, predomina el "flujo en masa". Conforme aumenta el rozamiento o disminuye el ángulo de inclinación de las paredes aparece y se intensifica el "flujo de conducto". Esto ocurre en ambos tipos de depósito, aunque en los depósitos excéntricos, la transición de "flujo en masa" a "flujo de conducto" es más gradual.

Por otra parte, se observa que, aunque en los dos depósitos se produce un grado de segregación similar, en los depósitos concéntricos éste es mayor. Esto es debido a que las partículas finas se acumulan cerca de las paredes del depósito, quedando en la parte central material con poco porcentaje de finos. En consecuencia, el perfil de concentración de material fino es simétrico en los depósitos concéntricos. Sin embargo, en los depósitos excéntricos el perfil no es simétrico, ya que el material fino se acumula cerca de la pared inclinada, dejando material pobre en finos cerca de la pared vertical.

En función de los aspectos anteriores, los autores proponen varias geometrías e indican los flujos de descarga obtenidos y la segregación producida en cada una de ellas.

En este mismo año, 2010, Yu et al [49], realizaron un estudio cuyo procedimiento se asemeja al desarrollado por Ketterhagen, donde se estudia la segregación de un material ternario (compuesto por tres fracciones de material granular de diferente tamaño) durante el proceso de descarga de un búnker. Para llevar a cabo el estudio, se valida un modelo de simulación basado en elementos discretos mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con el valor medio recogido de ensayos experimentales.

De este análisis se deduce que hay parámetros como son el método de llenado y la segregación que se produce durante el mismo afecta significativamente sobre la segregación producida durante la descarga del depósito. El coeficiente de rodadura entre partículas sólo tiene un efecto sobre la segregación de las partículas finas durante el proceso de descarga. Reduciendo el coeficiente de rodadura entre las partículas y las paredes del depósito y el coeficiente de rozamiento estático se puede reducir el grado de segregación.

2.6 Simulación de materiales granulares

En la actualidad multitud de estudios se centran en la simulación de medios granulares para poder analizar y predecir su comportamiento.

Como ya se ha comentado, la simulación de este tipo de medios tiene un gran coste computacional y la dificultad de encontrar unos parámetros de simulación correctos que hagan que el modelo simulado se parezca a la realidad.

Para poder luchar contra esos factores adversos, diferentes autores han recurrido a técnicas que minimicen estas dificultades.

Un ejemplo de ello, ya mencionado en otras ocasiones es Ketterhagen et al [3] quien uso diferentes formas de llenado de la tolva "llenado por capas", "llenado bien mezclado" y "llenado industrial mediante tolva", para poder obtener los parámetros de la simulación y ajustar el modelo de elementos discretos. Una vez ajustado el modelo, éste es validado mediante los mismos ensayos experimentales, cambiando el método de carga de las tovas a "llenado bien mezclado", donde la segregación en el método de llenado afecta a las pruebas.

En el estudio de Ketterhagen, el primer tipo de los llenados "llenado por capas" consiste en verter el material granular totalmente segregado, depositando en la parte inferior una de las fracciones y, a continuación, sobre la misma, la fracción restante. Para realizar el "llenado bien mezclado", se preparan varias muestras pequeñas del material binario hasta obtener la cantidad total de material y se depositan individualmente en la tolva. Por otra parte, el "llenado industrial mediante tolva" se

realiza a través de una tolva previamente cargada mediante el "llenado bien mezclado", que es descargada sobre la tolva deseada.

En otro de los estudios de Ketterhagen, Ketterhagen et al [5] construyeron un modelo cuasi-tridimensional, mediante el cual se reduce su tamaño y el coste computacional (figura 20). Aunque un modelo bidimensional también simplificaría los cálculos, éste no se utiliza debido a que un análisis realizado previamente indica que es necesario considerar la tercera dimensión.

En este estudio, inicialmente, se comparó los resultados obtenidos de dos modelos cuasi-tridimensionales diferenciados entre sí por la anchura del perfil de la tolva. De dicha comparación se concluye que la distancia entre las paredes transversales no afecta a la segregación de la tolva durante su descarga.

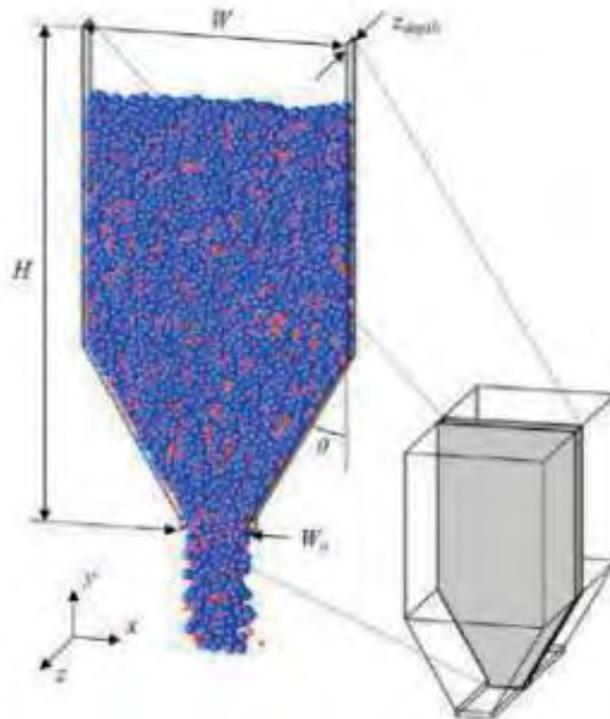


Figura 20. Modelo cuasi-tridimensional desarrollado en [5]

En 2010, Yu et al [50], realizaron un estudio cuyo procedimiento se asemeja al desarrollado por Ketterhagen, donde se estudia la segregación de un material ternario (compuesto por tres fracciones de material granular de diferente tamaño) durante el proceso de descarga de un búnker. Para llevar a cabo el estudio, se valida un modelo de simulación basado en elementos discretos mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con el valor medio recogido de ensayos experimentales.

En un primer lugar, se analiza la descarga del depósito cuando el material se ha colocado previamente por capas, evitando así la mezcla inicial de las distintas fracciones de material, lo cual facilita el análisis. Con esta tipología de llenado del depósito (por capas) se realizan tres ensayos distintos, variando el orden de las fracciones. De este primer análisis se deduce que, independientemente del orden en que se hayan colocado los materiales, los resultados siguen la misma tendencia

Wu et al [51] estudia el flujo de partículas durante la descarga de diferentes silos, realizándose un análisis experimental y simulaciones mediante DEM. En el estudio se emplean modelos bidimensionales, por lo que los silos tienen un grosor de 1 cm. Además, las paredes frontal y trasera de los silos son transparentes y permiten ver los patrones de flujo de las partículas, previamente coloreadas. Los modelos de silo examinados se corresponden a un depósito rectangular, a un depósito rectangular con terminación inclinada (en forma de embudo) y a tres variantes de este último, en las que se introducen diferentes injertos: un primer injerto con forma triangular, uno formado por dos placas inclinadas en sentido inverso a la forma inferior del silo y el último, formado por dos placas paralelas a las paredes inferiores del silo (véase la Figura 21). En cuanto a las partículas empleadas, éstas son de polietileno y tienen un diámetro medio de 0,8 mm, contemplándose cuatro distribuciones distintas del tamaño de las partículas: de diámetro uniforme, mezcla binaria, distribución normal y distribución aleatoria.

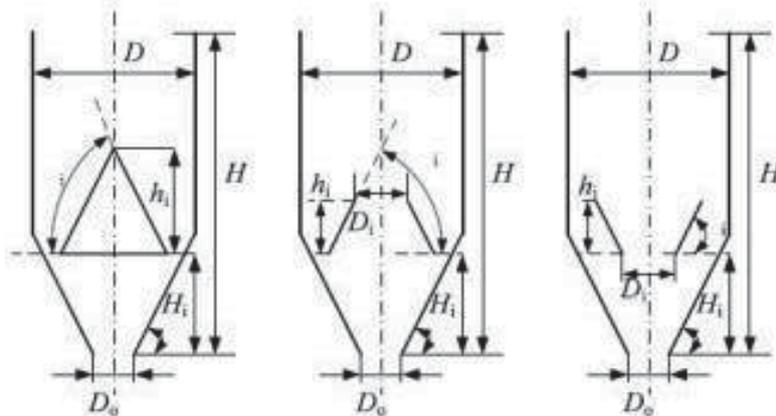


Figura 21. Geometría de los injertos empleados por Wu [9]

En primer lugar, se contemplan los patrones de flujo definidos durante el vaciado del silo, así como la distribución de velocidades de las partículas. Para ello, se realiza el llenado del mismo dejando dos franjas intermedias con el material coloreado. De este modo, se permite una mejor visualización del flujo. En el depósito rectangular se observa que el material de la parte superior se mueve en bloque, mientras que, en la

parte inferior se produce un flujo de conducto en la zona central y el estancamiento de las partículas en los laterales. En este caso, se observa que la velocidad de las partículas es baja en la parte superior del silo, casi nula en los extremos inferiores y sus mayores valores se encuentran en el centro, en las proximidades del orificio de salida. En el depósito rectangular con terminación inclinada desaparecen las zonas de estancamiento, pero permanecen los dos flujos definidos anteriormente (flujo en masa en la parte superior y flujo de conducto en la parte inferior). Con la adición de injertos, se modifica la distribución de las velocidades y, por lo tanto, el flujo de las partículas. De los tres injertos contemplados, el que permite un flujo más uniforme es el que tiene dos placas paralelas a las paredes inferiores del silo.

Por otra parte, se analiza el caudal de descarga en función del diámetro del orificio de salida para las diferentes distribuciones de tamaño de partícula. Se observa que cuanto mayor es el orificio mayor es el caudal de descarga. Además, en el caso del depósito rectangular, se muestra cierta diferencia para las distintas mezclas, siendo el efecto más acusado en la mezcla con distribución normal y mostrándose en menor medida con el material de diámetro uniforme.

También se examina la evolución del caudal de descarga a lo largo del tiempo. En todos los silos se producen fluctuaciones, aunque éstas son más acusadas durante el vaciado del silo rectangular, donde, además, el valor medio es inferior.

2.7 Segregación producida durante el llenado de matrices

En 2011 Guo et al [52], publicaron un artículo donde se estudió la segregación de un material binario, compuesto por partículas de diferente tamaño durante el llenado de una matriz. Para ello, emplean dos modelos analíticos bidimensionales que combinan el método de los elementos discretos (DEM) con una aproximación de dinámica computacional de fluidos (CDF). Los dos modelos consisten en un depósito superior (zapato), donde se encuentra inicialmente el material granular, que permite que el contenido caiga en una matriz situada en la parte inferior. En uno de los modelos, el zapato y la matriz permanecen en reposo (uno encima del otro) y, en el otro modelo, el zapato se desliza en dirección horizontal sobre la matriz.

Además, se estudian dos configuraciones de cada modelo: una configuración tridimensional y una simplificación de la anterior, que consiste en la disminución del espesor a una quinta parte, como se muestra en la figura 22. Con esta doble configuración se constata que es posible realizar el estudio de la segregación mediante la configuración simplificada ya que los resultados son muy similares, como pasaba en los estudios de Ketterhagen.

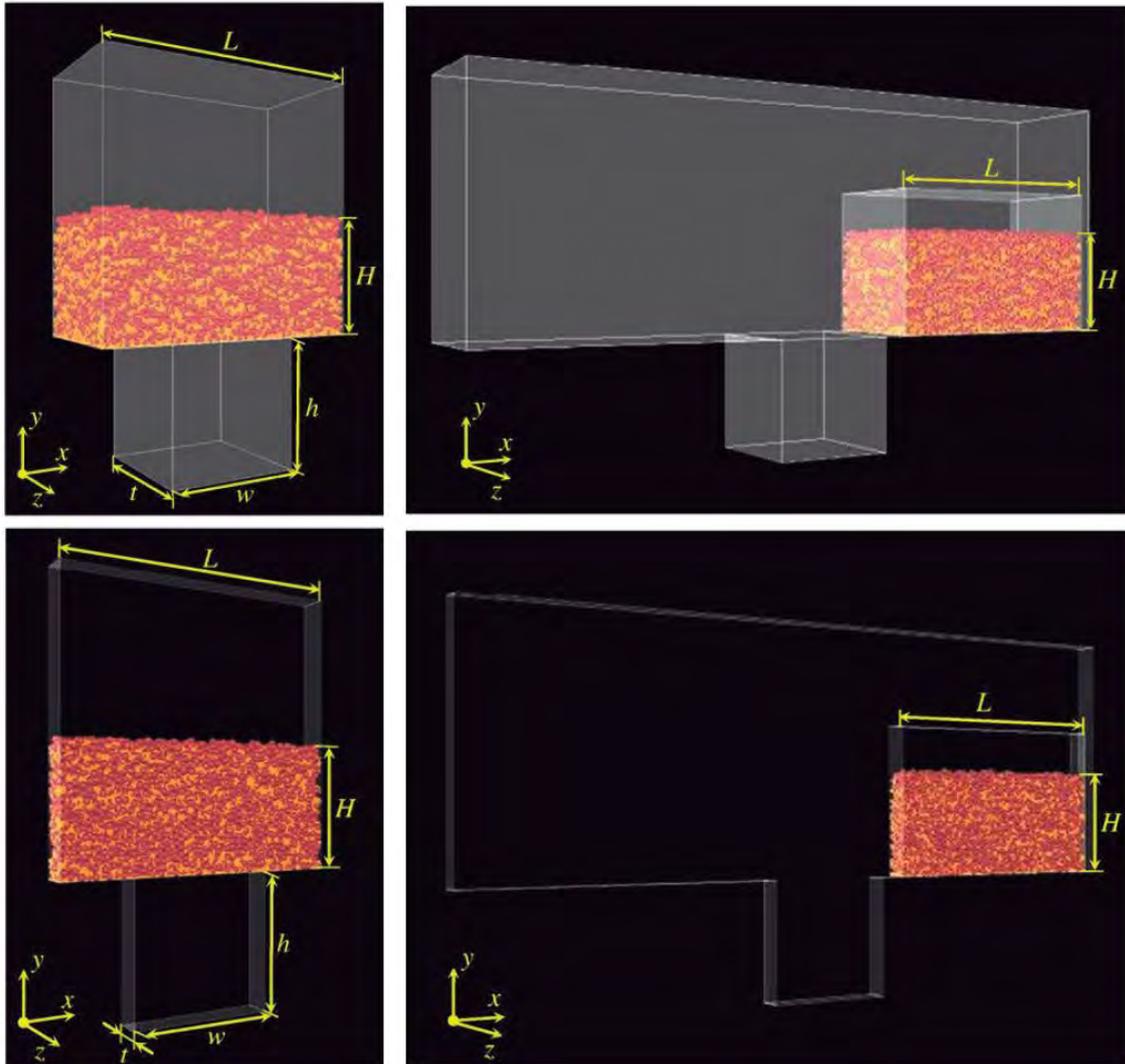


Figura 22. Modelos tridimensionales y simplificados empleados por Guo en [50].

En este estudio también se hace una simulación teniendo en cuenta el efecto del aire y otra sin la presencia de aire (en vacío) y la conclusión fue que tras el llenado de la matriz con el modelo estático en ausencia de aire, se observa que, en la superficie libre se produce una forma cóncava y que, tanto en la zona central como en toda la superficie, se acumulan partículas gruesas. Por contra, con la presencia del aire, la capa superficial de partículas gruesas es menor y las partículas gruesas se acumulan en las paredes laterales de la matriz. Sin embargo, la concavidad se mantiene.

También se analiza el flujo de llenado de la matriz durante todo el proceso mediante la concentración de partículas finas en el interior de la matriz. Se observa que, inicialmente, la concentración de material fino es muy elevada, debido a la segregación provocada durante la preparación de la muestra, y decrece conforme se va llenando la matriz. Poco antes de que se ocupe todo el volumen de la matriz, se produce un

aumento del porcentaje de material fino. Esto es debido a que las partículas finas tienden a rellenar los pequeños huecos que no son capaces de llenar las partículas grandes. Este patrón se genera tanto en ausencia como en presencia de aire, aunque el porcentaje de material fino es inferior cuando está presente el aire. Este fenómeno es la consecuencia de que las partículas finas son más sensibles al aire que las gruesas y son retenidas en el zapato.

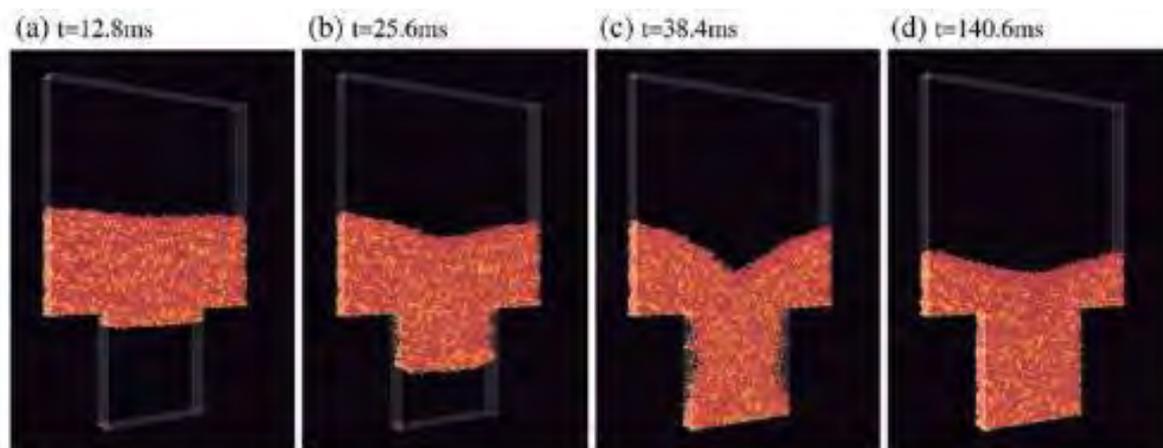


Figura 23. Proceso de llenado estático explicado en Guo [50].

Con el modelo dinámico se realiza el mismo análisis. De la observación del llenado de la matriz se concluye que la presencia de aire apenas tiene influencia sobre el resultado, ya que, durante el proceso, el aire puede escapar de la matriz antes de que esta esté totalmente llena. Además, como el zapato continúa moviéndose sobre la matriz después de que ésta se haya llenado, se depositan partículas finas en la parte superior de la matriz. Por eso, además de generarse mayor concentración de material fino en el fondo de la matriz, como consecuencia de la percolación, también puede observarse en la parte superior. Por otra parte, atendiendo a la distribución de las partículas finas en dirección longitudinal, se muestra un aumento gradual de la concentración en el sentido contrario al movimiento del zapato, es decir, el mayor porcentaje se ubica en la zona donde primero entran en contacto el zapato y la matriz.

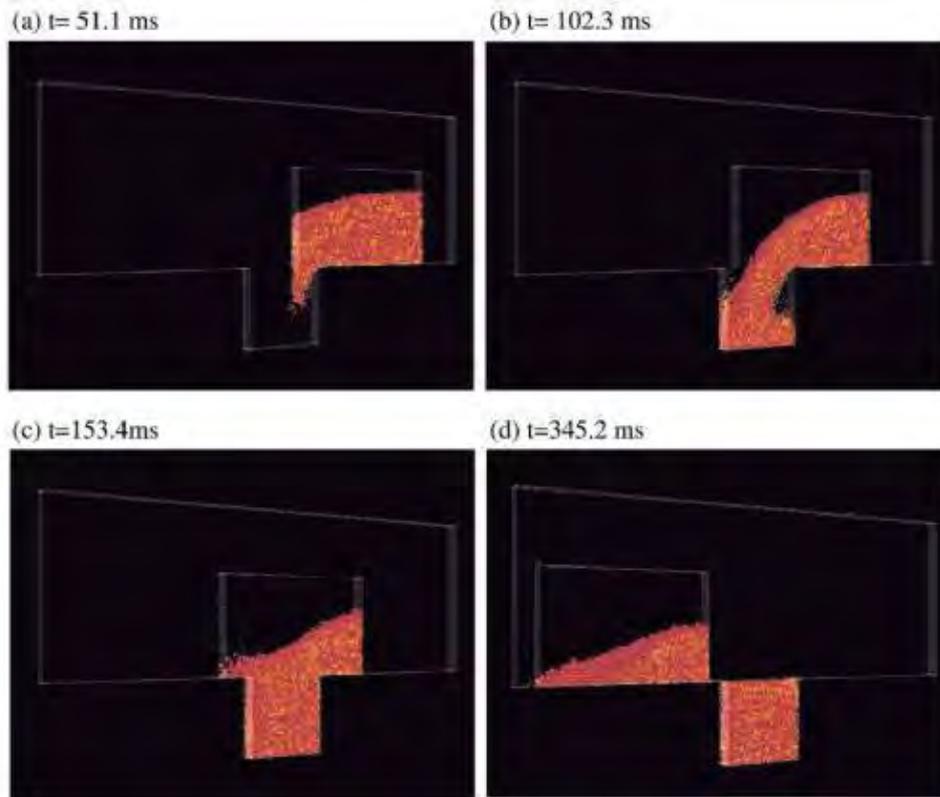


Figura 24. Proceso de llenado dinámico explicado en Guo [6].

El mismo año, Guo et al [53], volvieron a estudiar el efecto que tiene el aire en la segregación de un material binario compuesto por partículas de diferente densidad durante el llenado de una matriz, tanto con un zapato estático como con un zapato que se desliza sobre la matriz. En este caso, se emplean dos modelos analíticos bidimensionales que, al igual que en el caso anterior, combinan el método de los elementos discretos (DEM) con una aproximación de dinámica computacional de fluidos (CDF). Los dos modelos consisten en un zapato, donde se almacena inicialmente el material, que es descargado en una matriz situada en la parte inferior. De nuevo, uno de los modelos es estático (no se mueven ni la matriz ni el zapato) y, en el otro modelo, el zapato se traslada horizontalmente sobre la matriz, de manera que se puede estudiar la segregación producida por dicho movimiento.

En una primera simulación, se estudia el fenómeno de la segregación durante el llenado de la matriz con dos materiales de diferente densidad y se obtienen los patrones de llenado que permiten explicar algunas alteraciones en la concentración debido a los rebotes de las partículas en algunas paredes. El resultado de la simulación indica que, en ambos modelos, la concentración de partículas pesadas es mayor en el fondo de la matriz y que, en el modelo dinámico, la concentración del material menos denso es

inferior en el lado opuesto al movimiento debido a que las partículas menos densas salen al exterior de la matriz.

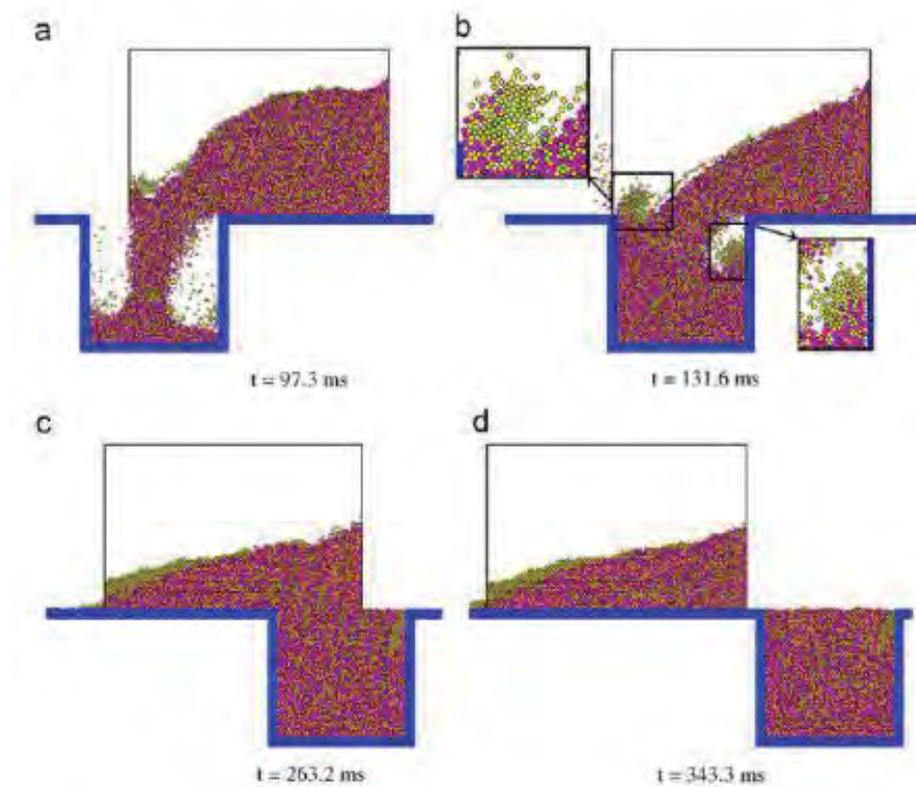


Figura 25. Llenado de una matriz en movimiento teniendo en cuenta el efecto del aire [51].

Además, se analiza la influencia que tiene sobre la segregación la diferencia de densidades existente entre los dos materiales. Para ello, se analizan diferentes mezclas, donde el material de menor densidad se mantiene invariable, mientras que se aumenta gradualmente la densidad del material más denso. De este análisis se deduce que, cuanto mayor es la diferencia de densidades, mayor es la segregación producida. Esto es debido a que las partículas de mayor densidad son menos sensibles al aire, de manera que cuanto mayor es la densidad, el efecto del aire es menos acusado y la velocidad de las partículas se ve menos reducida.

Otro factor que se analizó fue el efecto de la velocidad de desplazamiento del depósito, concluyendo que se produce mayor grado de segregación cuando el depósito se mueve a velocidades bajas.

Finalmente, se observa que los coeficientes de fricción entre partículas y los coeficientes de fricción entre las partículas y la pared del depósito tienen un efecto despreciable sobre la segregación.

CAPÍTULO 3

SEGREGACIÓN DE MATERIALES PARTICULADOS

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

3 SEGREGACION DE MATERIALES PARTICULADOS

3.1 Fenómeno de segregación

Se considera que un material en polvo ha sufrido un proceso de segregación cuando presenta variaciones importantes en la distribución de las partículas que lo componen. Por diferentes motivos, unas partículas se separan de las otras, dando lugar a una mezcla no homogénea del producto.

En muchos de los procesos industriales en los que se manipulan sólidos en polvo, es preciso mantener intactas determinadas características del producto durante todo el proceso para lograr la calidad exigida en el producto final y algunos de los problemas más comunes en relación con la calidad del producto final son consecuencia de la segregación o desmezcla del material.

La aparición de este fenómeno así como su magnitud, depende tanto de la técnica de manipulación como de las características físicas del producto (tamaño, forma, densidad y fricción).

Un material es tanto más propenso a sufrir segregación durante su manipulación cuanto:

- Mayor sea la gama de tamaños de las partículas de que se compone.
- Mayor sea la diferencia entre las densidades de los componentes que forman la mezcla.
- Mayor sea la diferencia entre sus formas o la diferencia en la composición.

Así pues, según todo ello, distinguimos los tipos de segregación, en función de las diferencias de las propiedades físicas de los componentes del producto:

- **Segregación por tamaño:** Se considera que un material en polvo ha sufrido un proceso de segregación por tamaño cuando presenta variaciones importantes en la distribución del tamaño de las partículas que lo componen. Por diferentes motivos, las partículas de mayor tamaño se han separado de las partículas menos gruesas (finos), dando lugar a una mezcla no homogénea del producto.
- **Segregación por forma:** Cuando el producto presenta variaciones importantes en la distribución de la forma de las partículas que lo componen, se denomina segregación por forma. Las partículas más redondeadas se han separado de las partículas con formas más planas.

- **Segregación por proporción de los componentes de la mezcla:** La homogeneidad en el mezclado y por ende la segregación es tanto más difícil de conseguir cuanto más diferentes son las cantidades de cada componente. En la industria farmacéutica ocurre con frecuencia que el componente más importante (el fármaco) es el que se encuentra en menor proporción, lo cual agrava el problema, ya que es precisamente la concentración de este componente la más difícil de homogeneizar.
- **Segregación por densidad:** Finalmente, si en una mezcla de diferentes productos, el componente más denso se ha separado del componente menos denso presentando variaciones importantes en la distribución de la composición, hablaremos de segregación por densidad.

Es evidente que las técnicas que emplean la mayoría de los sistemas de manipulación de sólidos a granel pueden, en mayor o menor medida, producir segregación. Así, el fenómeno de la segregación puede aparecer tanto en los procesos de transporte como en los de carga y vaciado de silos de almacenamiento, tolvas de consumo y máquinas compresoras.

3.2 Mecanismos de segregación

Se conoce con este nombre a todos aquellos procesos o situaciones que pueden producir segregación.

Existe gran variedad de mecanismos causantes de dicho fenómeno, a continuación, se describen los principales mecanismos responsables de los problemas de segregación de partículas:

- **El mecanismo de condensación** Tiene su origen en la diferencia de la densidad de las partículas, las partículas más pesadas tienden a ubicarse en la parte baja del medio y las menos pesadas en la superior, Schröter et al [57]
- **El mecanismo de convección** se presenta en mezclas de partículas de diferentes tamaños, que al someterse a ciertas condiciones de vibración (en un contenedor), presentan un movimiento cíclico que hace que se acumulen en regiones localizadas, Zuriguel [58].
- **La segregación por percolación** se origina por la entrada de las partículas pequeñas en los espacios vacíos generados por las partículas grandes, en la dirección de la aceleración de la gravedad, hasta que la estructura granular tiende a ser localmente de partículas iguales.

- **Trayectoria de segregación**, por el cual los efectos de fricción reducen las velocidades de las partículas más pequeñas o más angulares en una fina capa de material en movimiento.

3.3 Factores que influyen en la mezcla de sólidos

Como ya se ha comentado anteriormente, los factores o variables que influyen en el mezclado son: el tamaño de partícula, la forma, cohesividad (los polvos con alta cohesividad de superficie son más resistentes al mezclado), etc.

Entre los factores más importantes del material que influyen en el mezclado están:

- **Forma de partícula:** El mezclado puede alterar la forma por erosión y fragmentación produciendo partículas de forma irregular. La forma es la variable más crítica que afecta las características de flujo y el grado de empaquetamiento de las partículas. Las formas esféricas y ovaladas fluyen más fácilmente, mientras que las formas rugosas y fracturadas fluyen poco y las aciculares forman un enrejado que dificultan el flujo.
- **Tamaño de partícula:** Idealmente todas las partículas a mezclar deben tener un mismo tamaño de partícula, por lo tanto éstas se deben moler y tamizar antes de mezclar. Sin embargo el hecho de tener igual tamaño no quiere decir que tengan la misma forma y se facilite el flujo. En general los polvos con diámetro promedio menor a 100µm poseen poco flujo y dificultan el mezclado. Si se mezclan partículas con diferencias grandes de tamaños, estos tienden a segregarse depositándose los más pequeños en el fondo del mezclador.
- **Proporción de cada componente:** Si la proporción de uno de los componentes es muy pequeña, es difícil obtener buena homogeneidad como en el caso de los fármacos, colorantes, aromatizantes y saborizantes. Cuando la proporción del principio activo es menor del 5% se recomienda mezclar el fármaco con una pequeña proporción del excipiente y luego seguir agregando pequeñas proporciones de los excipientes. Otro método es si lo permite el fármaco es disolver a éste en un solvente volátil y agregarlo en al mezclador.
- **Densidad:** Cuando hay grandes diferencias de densidades de los componentes de la mezcla se producirá segregación, a pesar de que todas las partículas sean del mismo tamaño. Las partículas más densas se deslizan y caen en el fondo. Si la diferencia de densidades ocurre entre partículas grandes, la separación ocurre por adhesión y fricción.

La segregación puede ocurrir al vaciar el mezclador, durante el transporte y almacenamiento debido a las vibraciones del recipiente que contiene el material.

Este factor es minoritario en la industria farmacéutica ya que la mayoría de las materias primas poseen densidades similares.

- **Fuerza electrostática:** Este es un factor muy importante generado en materiales no conductores de electricidad. El mezclado de dos materiales con igual carga provoca una fuerza de repulsión que conduce a la segregación y a adherencia de uno de los materiales en las paredes del equipo.

Los compuestos orgánicos tienden a acumular mayor carga electrostática. Las cargas se generan por el roce de materiales que generan electrones en su superficie cuya carga no se puede contrarrestar. Por esta razón, los metales y las sales inorgánicas disipan más fácilmente la carga estática que los orgánicos.

La acumulación de cargas se puede disminuir con la adición de agentes tensoactivos al polvo que le aumentan su conductividad de superficie, otra forma es realizando el mezclado a una humedad mayor del 40%.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

4 METODOLOGÍA

La metodología seguida en el presente estudio consta de dos procesos diferentes: análisis experimental y simulación mediante el método de los elementos discretos.

El análisis experimental, consiste en la realización de diferentes ensayos con una máquina compresora excéntrica, que permiten realizar un estudio inicial de la segregación producida en cada uno de ellos y obtener valores reales del proceso con los que comparar los resultados de las simulaciones. En este caso, se analiza la concentración de material fino, así como la masa total de cada uno de los comprimidos obtenidos.

Durante el proceso de simulación, se genera un modelo de elementos discretos, en el que es necesario realizar el ajuste de ciertos parámetros hasta obtener resultados similares a los obtenidos experimentalmente.

En resumen, el estudio se desarrolla en tres fases distintas:

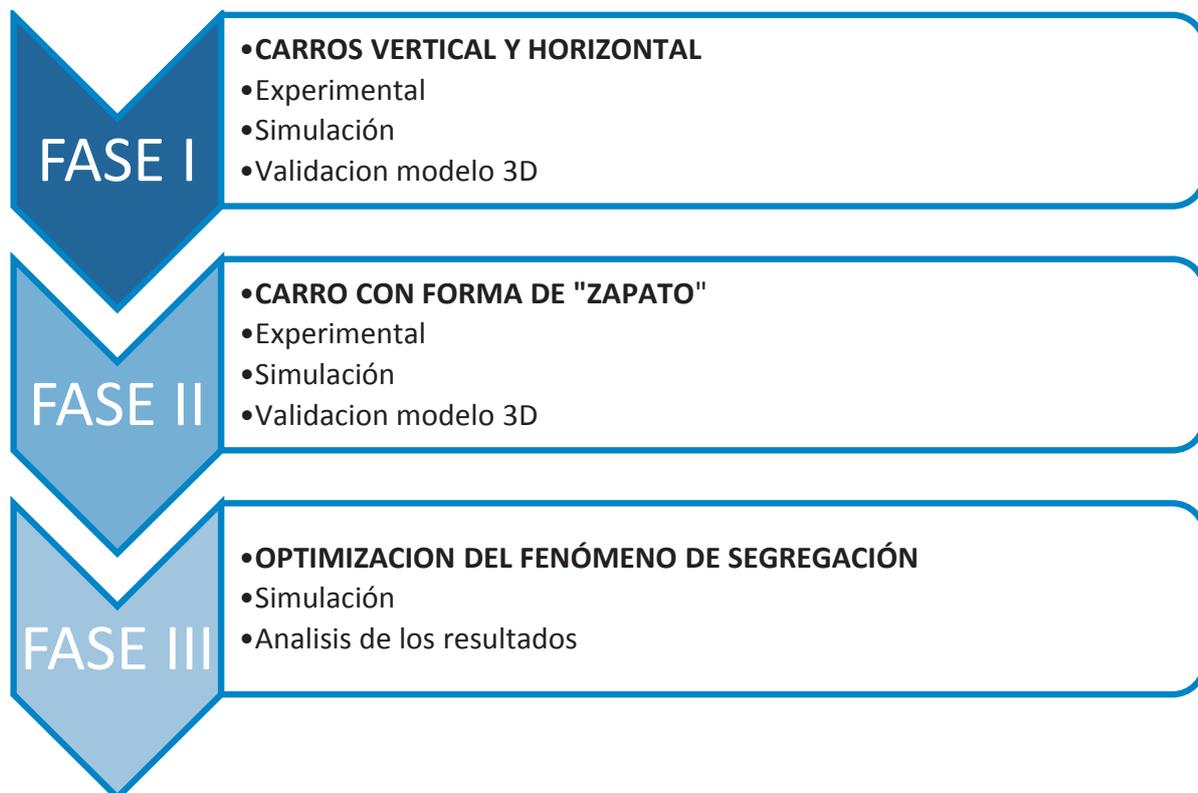


Figura 26. Diagrama de flujo simplificado del estudio.



Figura 27. Diagrama de flujo del estudio.

4.1 Diseño de experimentos

Una vez conocidos los objetivos del estudio y tras analizar los procedimientos descritos por varios investigadores, se determinan los ensayos experimentales que es necesario realizar para alcanzar dichos objetivos, así como cuáles son las características que debe tener el equipo de trabajo, los materiales, etc.

Basándonos en nuestra propia experiencia y en los conocimientos adquiridos con el desarrollo del estudio del arte, hemos realizado el siguiente diseño de experimentos:

Grabado en video: En varios estudios ([6] y [7]), los investigadores realizan grabaciones de vídeo del proceso efectuado durante el ensayo con la finalidad de poder determinar los flujos o el estado de la mezcla en diferentes momentos. Por eso, construyen con materiales transparentes las máquinas o dispositivos que contienen el material.

Partículas con diferentes colores: Para distinguir materiales granulares de distintas características cuya diferencia no se aprecia a simple vista, se seleccionan partículas con diferentes colores o materiales, que permiten visualizar el movimiento de las distintas partículas y así analizar los mecanismos de segregación originados durante el ensayo [50]. Desde el principio se tuvo en cuenta esta premisa para la elección de las partículas, pero basándonos en nuestra propia experiencia, hemos tenido que añadir la restricción del material de las partículas para que nos facilitasen la fabricación de los comprimidos sin generar atascos en el carro.

Llenado por capas: De los artículos desarrollados por Kettergahen [3] y Yu [49] se deduce que para construir el modelo de elementos discretos es aconsejable realizar varios ensayos llenando el carro alimentador “por capas” para ajustar los parámetros y, a continuación, validar el modelo por comparación con ensayos en los que se realiza un “llenado industrial” del carro.

Simplificación de la geometría del carro “modelo 2D”: En algunos casos, también se realizan simplificaciones sobre el modelo real con el propósito de acortar las simulaciones. En ocasiones, las simplificaciones suponen generar un modelo bidimensional ([6], [51]) y en otras reducir el grosor del depósito ([3], [5] [50]).

Simplificación de la geometría del carro “Carro V y H”: Basándonos en nuestra propia experiencia en Martínez et al [1] Y Martínez et al [2], se ha simplificado la geometría del carro “zapato” para eliminar el cambio de columna.

Por otra parte, González-Montellano et al. [52] propone realizar tres repeticiones de cada ensayo experimental con el fin de atenuar las distorsiones que puedan producirse puntualmente en alguna de las pruebas.

Realizado el análisis anterior, se procede a formular unos criterios que deben cumplirse para desarrollar el estudio de forma óptima. Estos criterios son los siguientes:

- La máquina debe estar construida con un material transparente para poder visualizar el movimiento de las partículas. Todas las piezas de la máquina (salvo las uniones atornilladas) son de policarbonato. Y se construirán nuevos depósitos simplificados.
- Se deben realizar grabaciones de video desde diferentes lugares (vista frontal del carro alimentador y vista del fondo del mismo). Para ello, el diseño de la máquina debe ser adecuado. En este caso, se diseña una bancada que permite colocar una cámara de vídeo entre el suelo y la parte inferior de la máquina.
- Los materiales que componen la mezcla deben distinguirse fácilmente y a simple vista. Para lograr esta medida, se emplean materiales de diferente color.
- Se debe comprobar si es posible realizar simplificaciones en los ensayos. De este modo, se construye un carro con un grosor de 20 mm, además del carro con el grosor real de 51 mm. También se realiza un llenado con una cantidad moderada de material frente a las grandes cantidades que se emplean en los procesos reales.
- Para ajustar el modelo de elementos discretos, se realizan unos ensayos en los que se realiza un llenado “por capas” del carro alimentador con poca cantidad de material.
- Se deben realizar tres ensayos empleando distintas mezclas con cada configuración del carro alimentador. Una mezcla debe tener la misma cantidad de cada material y cada una de las otras mezclas debe tener un material mayoritario diferente.
- Se deben realizar tres repeticiones de cada ensayo.

4.2 Análisis experimental

4.2.1 Descripción del equipo

4.2.1.1 *Máquina empleada*

Los ensayos experimentales se realizan mediante el empleo de un prototipo de máquina compresora alternativa fabricado en policarbonato. El empleo de dicho material facilita el análisis visual del proceso, ya que permite observar la evolución del material a lo largo de la máquina.



Figura 28. Prototipo y principales componentes de la máquina.

Como se puede observar en la figura 28, el prototipo está formado, principalmente, por un carro alimentador móvil y una platina fija, obviándose el punzón superior de la máquina. Esta simplificación es posible puesto que en el presente estudio únicamente se analiza la segregación del material granular mediante la composición de cada uno de los comprimidos y, por lo tanto, el grado de compactación no aporta información útil.

El carro alimentador está formado por cuatro placas (una frontal, una trasera y dos laterales) que son fijadas entre sí mediante uniones atornilladas, de manera que se obtiene un depósito abierto por arriba y por abajo. Tanto la placa frontal como la trasera disponen de varios orificios, que permiten situar las placas laterales en diversas posiciones. Por su parte, existen dos parejas de placas laterales (de diferente anchura), de manera que pueden obtenerse varios grosores del carro.

4.2.1.2 Carros alimentadores empleados

En las máquinas compresoras excéntricas reales se emplean carros alimentadores de tamaño similar al carro denominado “carro 3D” en el presente estudio. Sin embargo, para facilitar el análisis de los ensayos, se emplea el “carro 2D”. Éste mantiene el tamaño del “carro 3D” en dos de sus dimensiones, mientras que en la tercera es menor. Ambos carros están formados por las mismas placas frontal y trasera y únicamente varían las placas laterales de un modelo a otro. En el “carro 3D”, las placas laterales tienen un ancho de 51 mm mientras que en el “carro 2D” el ancho de las mismas es de 20mm.

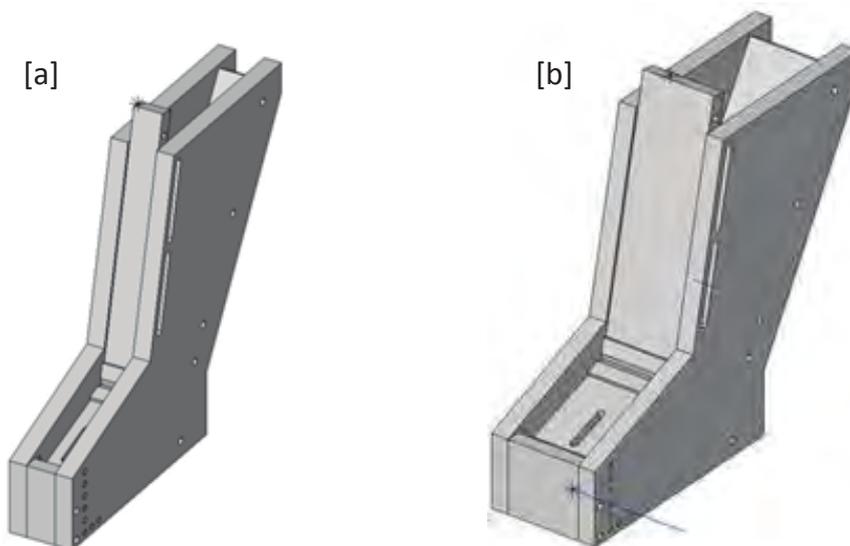


Figura 29. Carro 2D (a) y carro 3D (b).

4.2.1.3 Configuraciones del carro alimentador

De las múltiples configuraciones que puede adoptar el carro alimentador, para realizar los ensayos experimentales del presente estudio únicamente se emplean seis.

Vertical. Esta configuración se obtiene al situar las placas laterales en las segundas posiciones centrales de las placas frontal y trasera, de manera que éstas forman 90° con el plano horizontal. Esta configuración se muestra en la Figura 30.

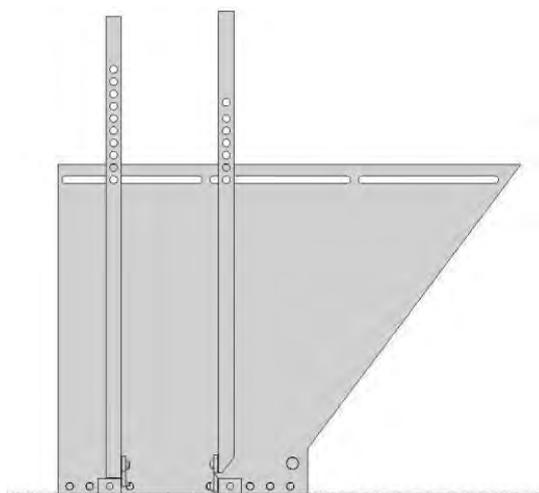


Figura 30. Configuración Vertical.

Horizontal. En esta configuración, las placas se mantienen formando 90° con el plano horizontal, pero se desplazan, situándose en los agujeros de los extremos (Figura 31).

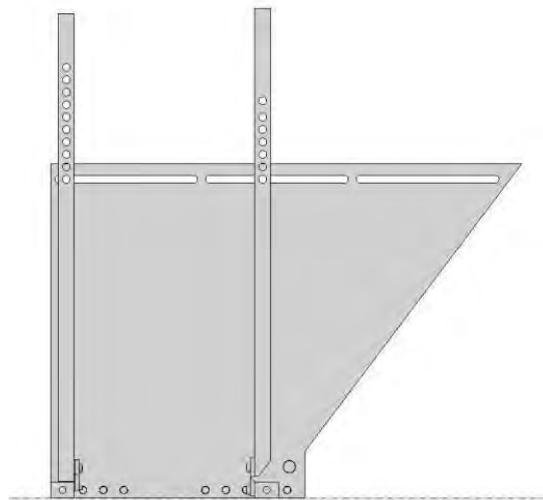


Figura 31. Configuración Horizontal.

2H-143. En esta configuración la placa frontal se fija al segundo orificio de la parte inferior de la “puntera” del zapato, formando esta pared articulada un ángulo de 143° . (Figura 32)

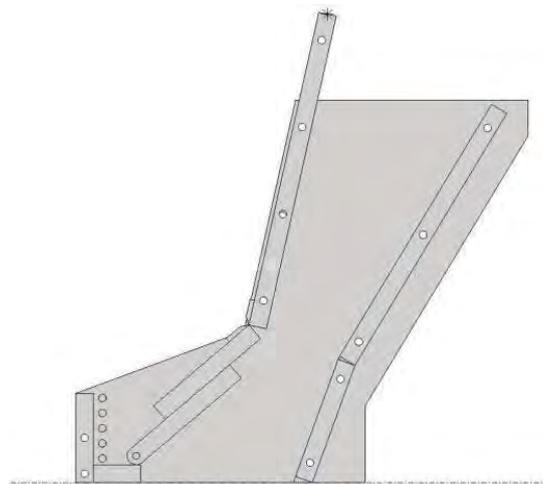


Figura 32. Configuración 2H-143.

1V-130. En esta configuración la placa frontal se fija al primer orificio de la parte superior externa, empezando por abajo, de la “puntera” del zapato. La pared articulada forma un ángulo de 130°. (Figura 33)

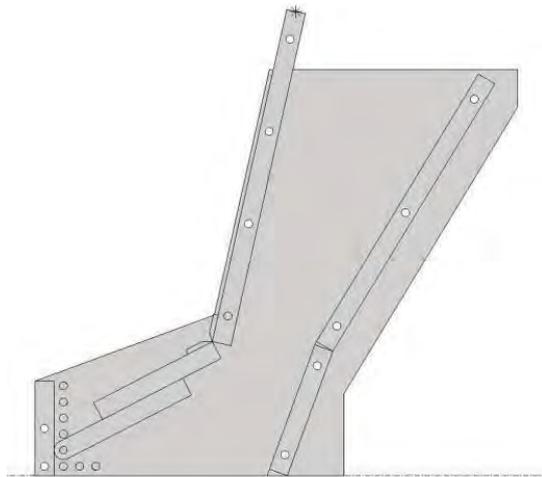


Figura 33. Configuración 1V-130.

2V-120. En esta configuración la placa frontal se fija al segundo orificio de la parte superior externa, empezando por abajo, de la “puntera” del zapato. La pared articulada forma un ángulo de 120°. (Figura 34)

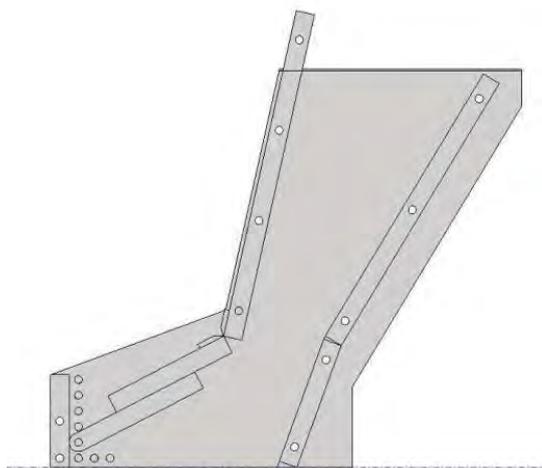


Figura 34. Configuración 2V-120.

4V-120. En esta configuración la placa frontal se fija al cuarto orificio de la parte superior externa, empezando por abajo, de la “puntera” del zapato. La pared articulada forma un ángulo de 120°. (Figura 35)

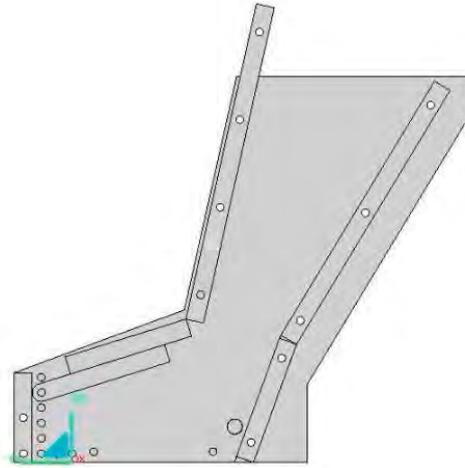


Figura 35. Configuración 4V-120.

4.2.2 Materiales empleados

Para realizar el estudio, se emplea dos mezclas binarias diferentes.

La primera de ellas está formada por dos materiales granulares de diferente tamaño:

Material de grano grueso. Pasta alimenticia (sémola de trigo) con un color amarillento. Este material posee una densidad de 1432 kg/m^3 , cuyo diámetro medio es de $3'823 \text{ mm}$ (forma esférica).

Material de grano fino. Pasta alimenticia (sémola de trigo) con un color amarillento. Este material posee una densidad de 1479 kg/m^3 cuyo diámetro medio es de $1,896 \text{ mm}$ (forma esférica).

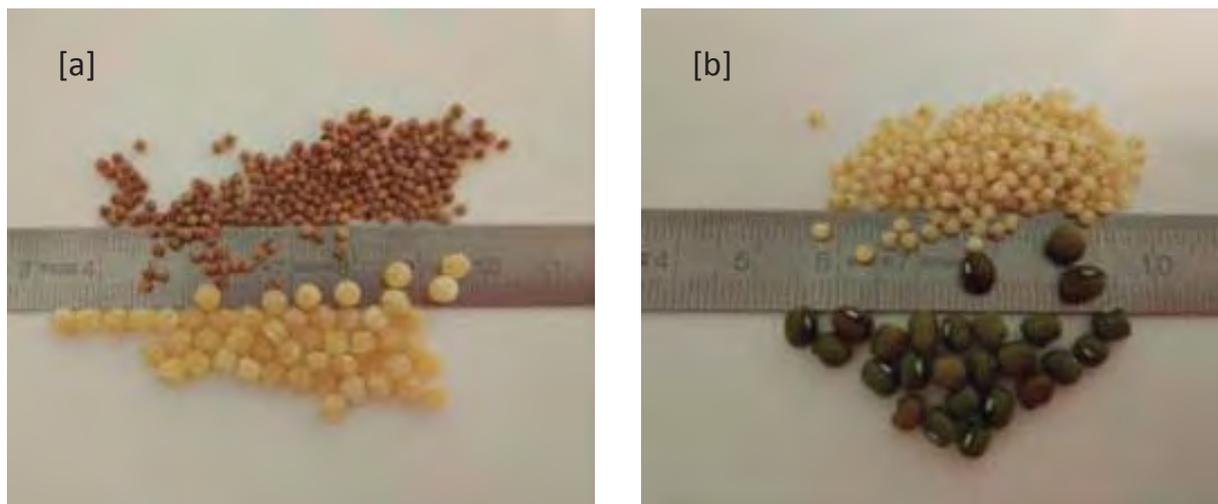


Figura 36 Material granular de sémola de trigo (a) y material granular de soja (grosso) y mijo (fino) (b).

La segunda mezcla binaria empleada:

Material de grano grueso. Semillas de soja de color verde. Este material posee una densidad de 1372 kg/m^3 y diámetro medio de $4,336 \text{ mm}$. (Forma casi esférica)

Material de grano fino. Semillas de mijo con un color amarillento. Este material posee una densidad de 1416 kg/m^3 y un diámetro medio de $2,006 \text{ mm}$. (Forma esférica)

Estas mezclas presentan materiales relativamente frágiles, que se rompen con facilidad en caso de que se produzca un atasco de la máquina.

Además, se ha elegido estos pares de materiales debido a que ambos tienen una densidad similar y mantienen una relación de tamaño aproximada de 2:1.

4.2.3 Mezclas empleadas

Durante este estudio, se han realizado ensayos con tres mezclas binarias compuestas por los materiales descritos en el apartado anterior:

25/75. Esta mezcla está formada por un 25% en masa de material fino y un 75% en masa de material grueso.

50/50. Compuesta por la misma cantidad de material fino que de material grueso, es decir, el 50% en masa corresponde a cada material.

75/25. Mezcla formada por un 75% en masa de partículas finas y un 25% en masa de partículas gruesas.

4.2.4 Métodos de llenado del carro alimentador

Durante el desarrollo del presente estudio, se han empleado diferentes metodologías de llenado del carro alimentador, que se describen a continuación:

Llenado por capas. En la metodología del llenado por capas se vierten dos o cuatro cantidades de partículas provocando una segregación planificada. De esta forma se crean capas de material una sobre la otra durante el proceso de llenado. Este tipo de llenado se puede observar en la figura 37 (a).

Llenado industrial. En la metodología de llenado industrial, se intenta imitar de la forma más veraz posible el proceso de llenado real que se realiza en un proceso de compresión. Este llenado consiste en depositar la mezcla “perfecta” en una tolva que posteriormente se abre y cae sobre el carro. Este tipo de llenado se puede observar en la figura 37 (b).

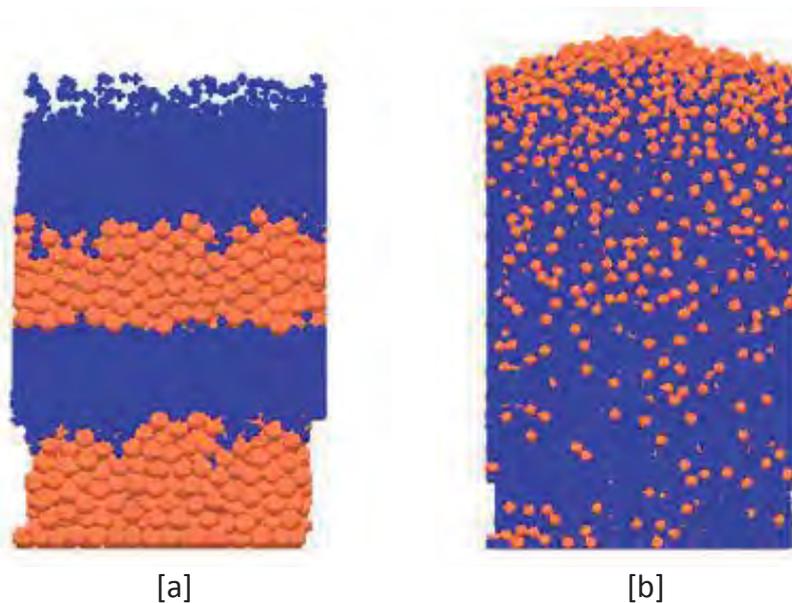


Figura 37. Carro alimentador tras el llenado por capas (a) y tras el llenado industrial (b).

Para poder obtener una mezcla perfecta en la tolva y siguiendo las recomendaciones de otros autores como puede ser Ketterhagen et al en [2], se preparan el número de fracciones del material binario necesarias, de forma que cada una de las fracciones contenga una parte del material total a introducir en la tolva. Estas fracciones se depositan sobre la tolva del carro intentando minimizar la segregación para hacer que el carro queda lleno de una forma fácilmente repetible y simulable con el software DEM.



Figura 38. Tolvas empleadas en el llenado industrial.



Figura 39. Fracciones de mezcla binaria empleadas para el llenado de la tolva,; izda sémola de trigo, dcha soja y mijo.

Llenado continuo. En esta metodología de llenado se comienza con un llenado industrial, la diferencia con la anterior radica en que cada 15 comprimidos se vuelve a añadir material.

Esta metodología se emplea para simular con la total rigurosidad el proceso real de llenado del carro, ya que en el proceso real, una tolva que contiene la mezcla del material granular vierte de manera continua sobre el carro.

4.2.5 Descripción de los ensayos

El ensayo comienza con la preparación de la mezcla. Para ello, se pesan las cantidades de material fino y grueso necesarios para realizar la prueba mediante una báscula de precisión.

A continuación, se llena el carro alimentador mediante uno de los métodos descritos en el apartado 2.2.4.

Una vez llenado se retira el depósito y se asegura el cierre superior para que no se escape el material

En este momento se realiza la siguiente secuencia con un accionamiento electro-neumático.

1. Movimiento de carro hacia adelante
2. Descenso del punzón de la matriz
3. Movimiento de carro hacia atrás
4. Ascenso del punzón
5. Movimiento de carro hacia adelante y recogida de la muestra

Esta secuencia se ejecuta las veces requeridas por el ensayo, hasta que se vacía el depósito. Durante el estudio este número ha oscilado entre doce y cien secuencias sucesivas.



Figura 40. Tamizado de las muestras.[53]

Para completar el ensayo, se pesa el material fino y el grueso de cada muestra. Para ello, se pasa cada muestra por un tamiz de 2,5 mm, de manera que el material fino pasa el tamiz, pero el grueso no. De esta forma se separan ambos componentes.



Figura 41. Báscula, tamiz y tubos de ensayo. [53]

4.3 Simulación DEM

Para realizar las simulaciones mediante DEM, se construye un modelo empleando el software EDEM®.

El modelo, se importa desde un archivo .stp creado previamente en catia.

4.3.1 Software CAD: Catia

CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora comercial realizado por Dassault Systèmes. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos. Está disponible para Microsoft Windows, Solaris, IRIX y HP-UX.

Fue inicialmente desarrollado para servir en la industria aeronáutica, pero actualmente CATIA es ampliamente usado en multitud de industrias, como la industria del automóvil para el diseño y desarrollo de componentes de carrocería, la industria de la construcción para desarrollar edificios de gran complejidad formal; como por ejemplo

el Museo Guggenheim Bilbao, y también está empezándose a desarrollar en ámbitos académicos.

4.3.2 Interfaz del software EDEM

La configuración de EDEM® se lleva a cabo por medio de dos pestañas.

La primera pestaña llamada “Creator”, sirve para determinar los parámetros de las partículas y de las geometrías y la segunda llamada “Simulator”, sirve para colocar las características del análisis de la simulación.

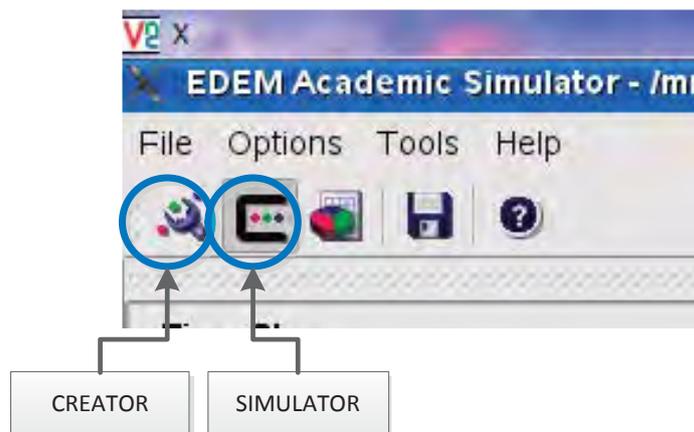


Figura 42. Pestañas configuración EDEM®.

Dentro de la pestaña “Creator”, se puede encontrar otro menú con pestañas, cada una de las cuales se encarga de definir una parte de los elementos de la simulación.

- **Global:** Dentro de esta pestaña se definen las características de rozamiento y fuerzas de las partículas y entre las partículas.
- **Particles:** Dentro de esta pestaña se definen las geometrías y materiales de las partículas.
- **Geometry:** Dentro de esta pestaña se definen las geometrías de la simulación y las dinámicas de los elementos.
- **Factories:** Dentro de esta pestaña se definen las factorías y las partículas que deseamos que se creen, en cantidad, ubicación, velocidad de creación, etc.

Dentro de “Simulator” se encuentran todas las opciones referentes al tiempo de simulación, tiempo de paso, número de núcleos de trabajo...

4.3.3 Creación del modelo de elementos discretos

4.3.3.1 Definición de los cuerpos del modelo

Los distintos cuerpos que entran en contacto con las partículas se definen en la pestaña *Geometry* seleccionando el material, densidad...

Los cuerpos que aparecen en todos los modelos (aunque tengan geometrías diferentes) son los siguientes:

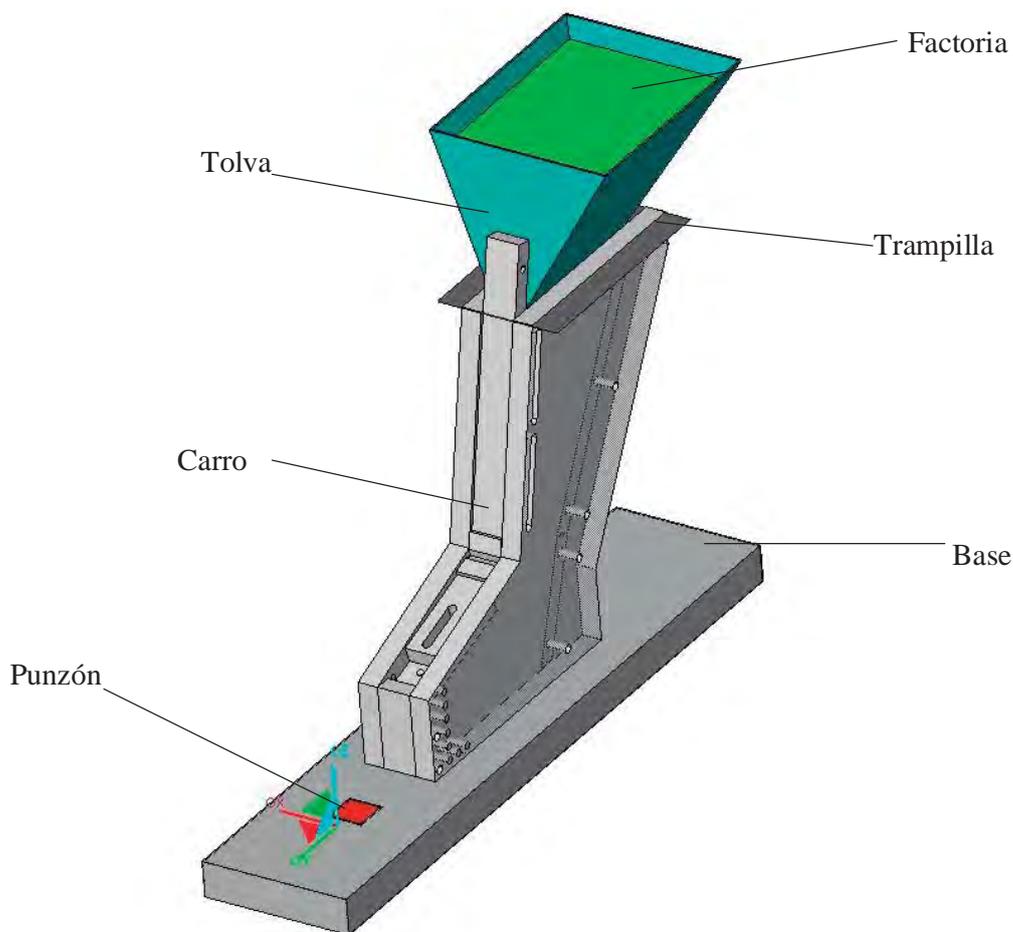


Figura 43. Cuerpos definidos en el modelo de simulación.

Además, existen cuerpos que se mueven en algún momento de la simulación (como la trampilla de la tolva para el llenado del carro, el carro o el punzón), por lo que es necesario crear dinámicas.

4.3.3.2 Definición de las partículas

El software EDEM® emplea partículas esféricas para la generación de los modelos de los ingredientes de la mezcla dentro del apartado “particles”.

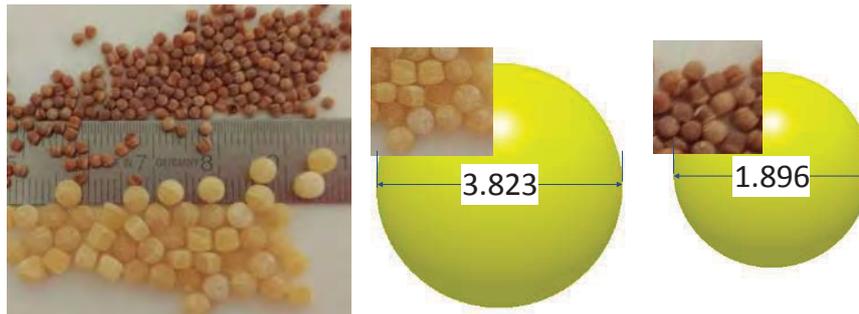


Figura 44. Definición de las partículas del modelo de simulación. Sémola-Sémola.

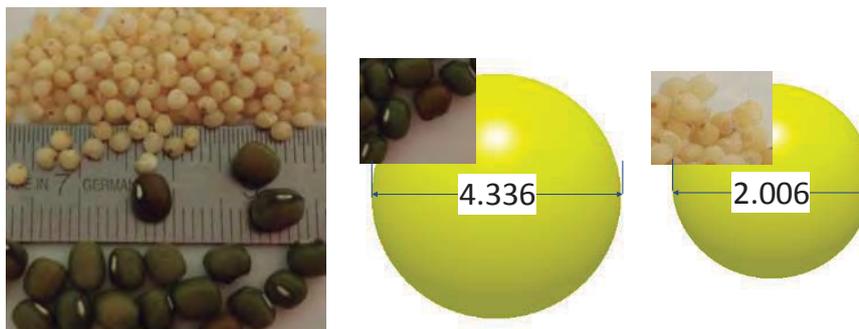


Figura 45. Definición de las partículas del modelo de simulación. Sémola -Soja.

En la misma pestaña se calcula el volumen, la masa y el momento de inercia de cada partícula.

4.3.3.3 Definición de las características de las partículas y de los cuerpos

Para comenzar con el proceso iterativo de ajuste de los parámetros de la simulación, se consultaron diferentes bibliografías y/o se realizaron ensayos de laboratorio para atribuir unos primeros parámetros.

Las densidades y diámetros de las partículas se han obtenido por medio un picnómetro. Los valores de restitución, Static friction y Rolling friction se han obtenido de [1], teniendo en cuenta que las partículas no son totalmente esféricas.

Como nos aconseja Ketterhagen et al [32], a las partículas se les ha introducido un coeficiente de rodadura que simule su falta de esfericidad.

Los valores de la tabla de más abajo, solo han sido una primera aproximación, ellos serán validados por medio de las simulación y cuando sea necesario recalibrados.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	Sémola Fina	Sémola Gruesa
Densidad	1480 kg/m ³	1432 kg/m ³
Módulo de cortadura	3.6e+06 Pa	3.6e+06 Pa
Poisson	0.4	0.4

Tabla 1. Valores iniciales de los parámetros de la simulación.

ITERACIÓN ENTRE PARTÍCULAS	Coefficiente Restitución	Coefficiente de fricción estática	Coefficiente de rodadura
I1- I2	0.8	0.5	0.01
I1 – I1	0.8	0.5	0.01
I1 – pared	0.8	0.15	0.01
I2 – I2	0.8	0.5	0.01
I2 – pared	0.8	0.15	0.01
Pared – pared	0.8	0.15	0.01

Tabla 2. Valores iniciales de los parámetros relativos a las interacciones.

4.3.3.4 *Definición de las mezclas*

Las mezclas de las partículas que van a formar parte de la simulación se crean dentro de la pestaña “Factories”

En esta pestaña se definen el número de partículas que se desea crear en cada modelo, el momento y el modo en que deben crearse.

Para crear las mezclas binarias se definen dos factorías (una para las partículas finas y otra para las gruesas).

CAPÍTULO 5

TOMA DE DATOS

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

5 TOMA DE DATOS

5.1 FASE I. Carro simplificado. Ajuste de parámetros.

Para ajustar los parámetros del modelo de simulación se emplean las configuraciones “Vertical” y “Horizontal” del carro alimentador y se realiza el llenado del mismo mediante “capas”. La masa introducida en el carro es de 80 gramos, 40 gramos de material fino y 40 gramos de material grueso.

En esta fase se emplean las configuraciones del carro cuyas placas laterales se encuentran en dirección vertical ya que, de este modo, el efecto que tienen las paredes del carro sobre las partículas es menor que en las configuraciones cuyas paredes se encuentran inclinadas. Otra característica de esta fase es que se introduce una cantidad reducida de material para disminuir el tamaño del modelo de simulación, ya que, en esta primera fase de ajuste de parámetros, es necesario realizar gran cantidad de simulaciones

Ia. Llenado por capas. En esta fase se realizan ensayos sencillos simplificando la forma de llenado (llenado por capas) para poder comprender los mecanismos de segregación y aplicar esos conocimientos en las posteriores fases. El “llenado por capas”, por una parte, permite observar con claridad el movimiento de las partículas y, por otra, simplifica el modelo de elementos discretos.

También hay que mencionar que en esta fase del estudio, se utilizan dos mezclas diferentes sémola-sémola y mijo-soja.

- **2D Vertical 90 2Capas** Para realizar este primer ensayo, se configura el carro en la posición “Vertical” y se llena con 80 gramos de material mediante capas, formando dos capas de 40 gramos. En la parte inferior del carro se coloca el material grueso y, encima de éste, se introduce el fino.
- **2D Vertical 90 4Capas** En este ensayo también se emplea la configuración “Vertical” del carro y se realiza el llenado mediante “capas”, pero, en este caso, se realizan cuatro capas de 20 gramos cada una, colocándose en orden ascendente una de grano grueso, una de grano fino, otra de grano grueso y otra de grano fino.
- **2D Horizontal 90 2Capas** Este ensayo se prepara del mismo modo que el ensayo “2D Vertical 90 2Capas”, pero con la diferencia de que en este ensayo se emplea la configuración “Horizontal” del carro.

- **2D-Horizontal 90 4Capas** El ensayo “2D Horizontal 90 4 Capas” es homólogo al ensayo “2D Vertical 90 4Capas” en cuanto al llenado del carro se refiere. Ambos ensayos se diferencian en la configuración del carro alimentador, siendo empleada la “Horizontal” en el ensayo 2D Horizontal 90 4Capas.

En la Figura 46 se puede observar la situación inicial de los diferentes ensayos, carros verticales y horizontales, llenados en 2 y 4 capas.

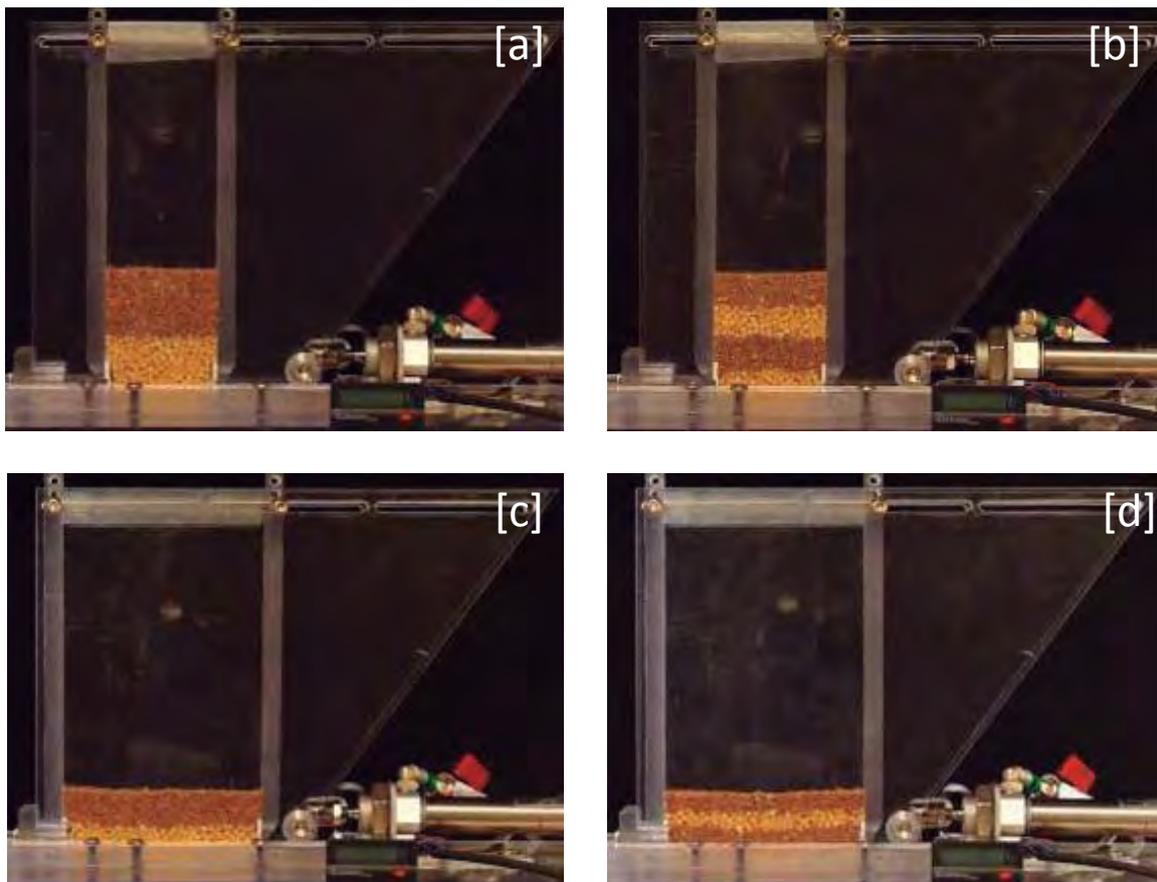


Figura 46. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo Sémola – Sémola 2D-Vertical 50/50 2Capas (a), 2D-Vertical 50/50 4Capas (b), 2D-Horizontal 50/50 2Capas (c) y 2D-Horizontal 50/50 4Capas (d).

En la Figura 47 se puede observar los resultados muestra a muestra de los 4 ensayos con un “llenado por capas” con sémola-sémola.

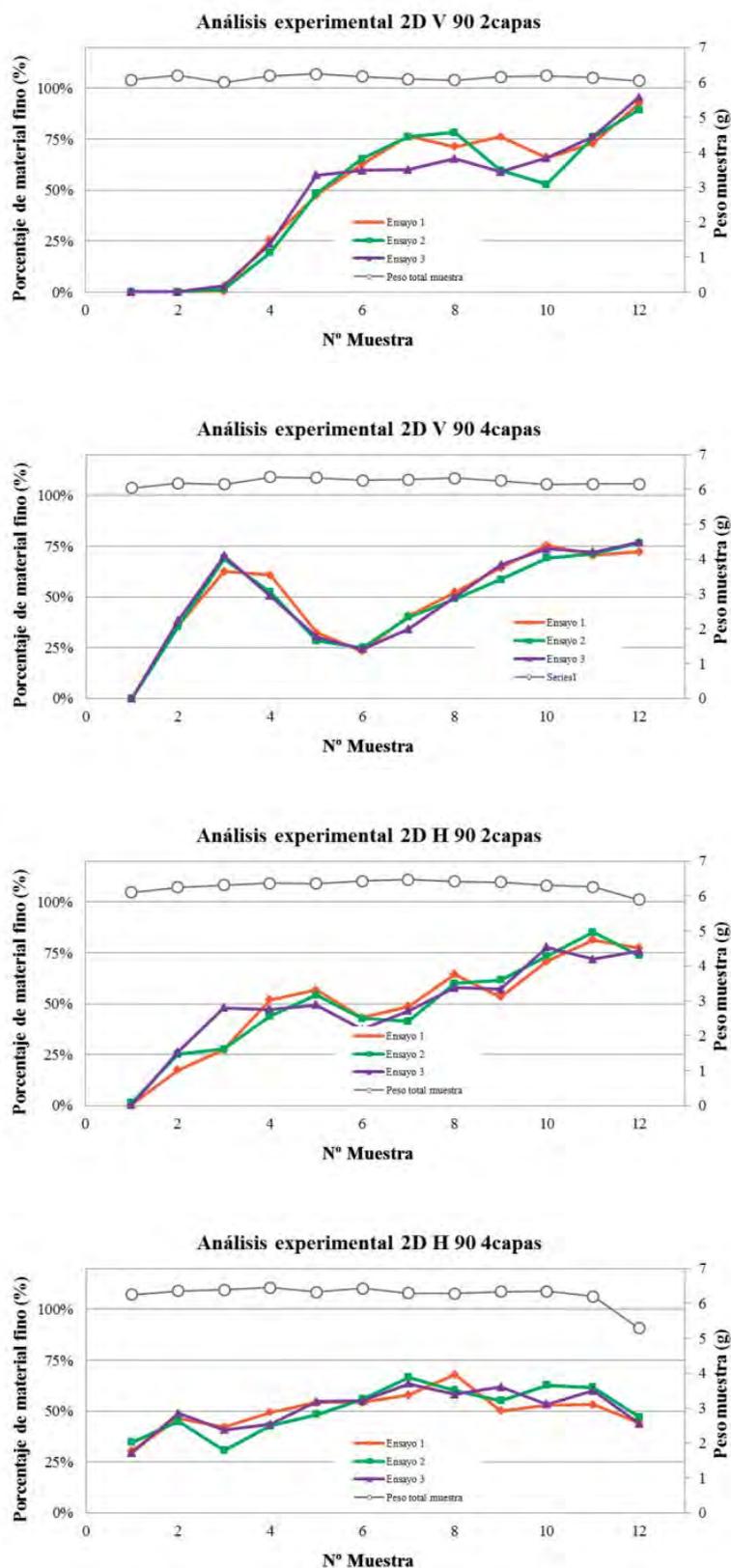


Figura 47. Resultados experimentales para la configuración 2D Vertical y Horizontal. Llenado por capas. Sémola- Sémola

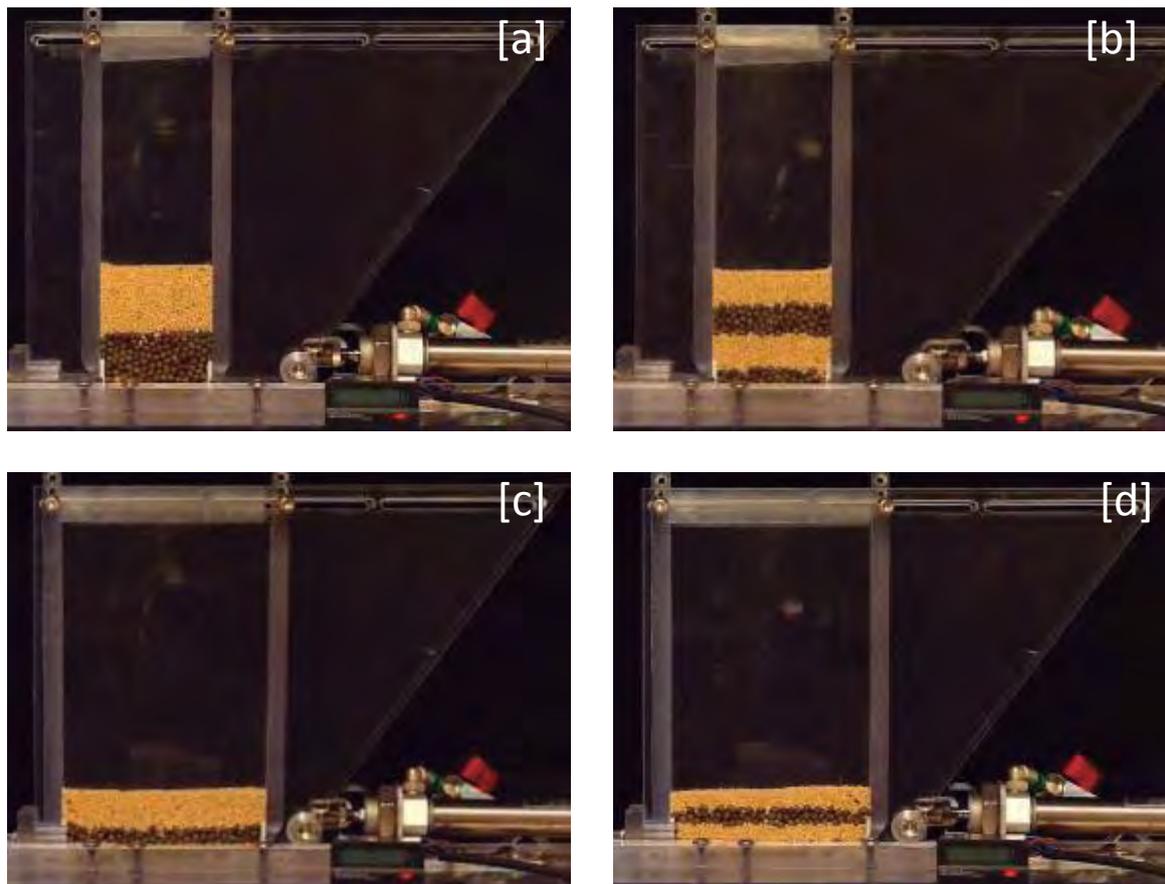


Figura 48. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo Sémola – Soja 2D-Vertical 50/50 2Capas (a), 2D-Vertical 50/50 4Capas (b), 2D-Horizontal 50/50 2Capas (c) y 2D-Horizontal 50/50 4Capas (d).

En la Figura 48 se muestra el estado inicial de los mismos ensayos del caso anterior, solo que en esta ocasión el material utilizado es mijo-soja.

La Figura 49 nos muestra la evolución muestra a muestra de los 4 ensayos con el material mijo-soja.

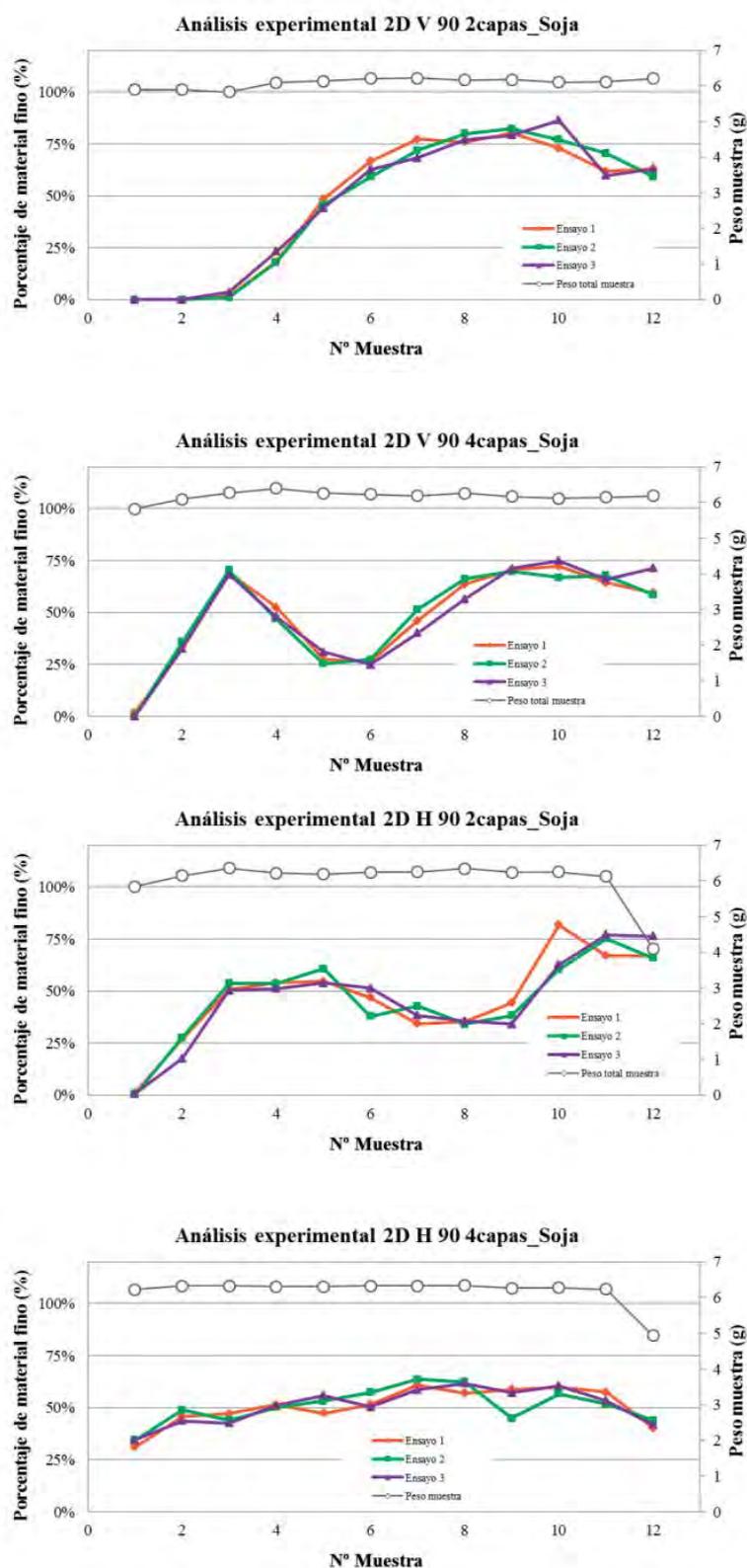


Figura 49. Resultados experimentales para la configuración 2D Vertical y Horizontal. Llenado por capas. Sémola- Soja

Ib. Llenado Industrial. En esta fase se realizan ensayos reproduciendo la forma de llenado industrial, pero con una configuración de carro sencilla para poder comprobar como la forma de llenado afecta al fenómeno de segregación y terminar de ajustar los parámetros de la simulación.

La cantidad de material empleado en estos ensayos es de 200 gramos, fraccionándose en distintas proporciones: 25% en masa de material fino (50 gramos) y 75% en masa de material grueso (150 gramos), 50% de material fino y 50% de material grueso (100 gramos de cada componente) y 75% de fino (150 gramos) y 25% de grueso (50 gramos). Al igual que se hacen pruebas con distintas mezclas, se emplean diferentes configuraciones del carro. Y como en la fase Ia, se han usado son materiales sémola-sémola y mijo-soja.

Con el conjunto de todas las combinaciones se pretende comprobar que los parámetros físicos de las partículas que se han considerado en el modelo de simulación son fieles a los reales.

- **2D-Vertical 25/75 Industrial** Para realizar este ensayo, se posicionan las paredes del “carro 2D” con la configuración “Vertical” y se realiza un llenado de tipo “industrial” con una mezcla de 50 gramos de material fino y 150 gramos de material grueso. Tras el llenado, el carro alimentador se encuentra en la situación mostrada en la Figura 50a.
- **2D-Vertical 50/50 Industrial** En esta prueba se mantiene la configuración “Vertical” del carro, pero se llena con igual masa de material fino que de material grueso, es decir, se emplean 100 gramos de cada ingrediente. La situación inicial del carro alimentador tras el llenado se muestra en la Figura 50 b.
- **2D-Vertical 75/25 Industrial** Al igual que en los ensayos anteriores, se emplea el “carro 2D” en la posición “Vertical”. En este caso, el porcentaje en masa de material fino es del 75% y sólo se emplea un 25% de material grueso, como se muestra en la Figura 50c.



Figura 50. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo Sémola-Sémola 2D-Vertical-25/75 Industrial (a), 2D-Vertical 50/50 Industrial (b) y 2D-Vertical 75/25 Industrial (c).



Figura 51. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo Sémola-Soja 2D-Vertical 25/75 Industrial (a), 2D-Vertical 50/50 Industrial (b) y 2D-Vertical 75/25 Industrial (c).

La situación inicial de las pruebas “verticales” se puede observar en las Figura 50 y Figura 51.

Las Figura 52 y Figura 53, muestran la evolución de la descarga de los carros “verticales” con llenado industrial y mezcla mijo – soja.

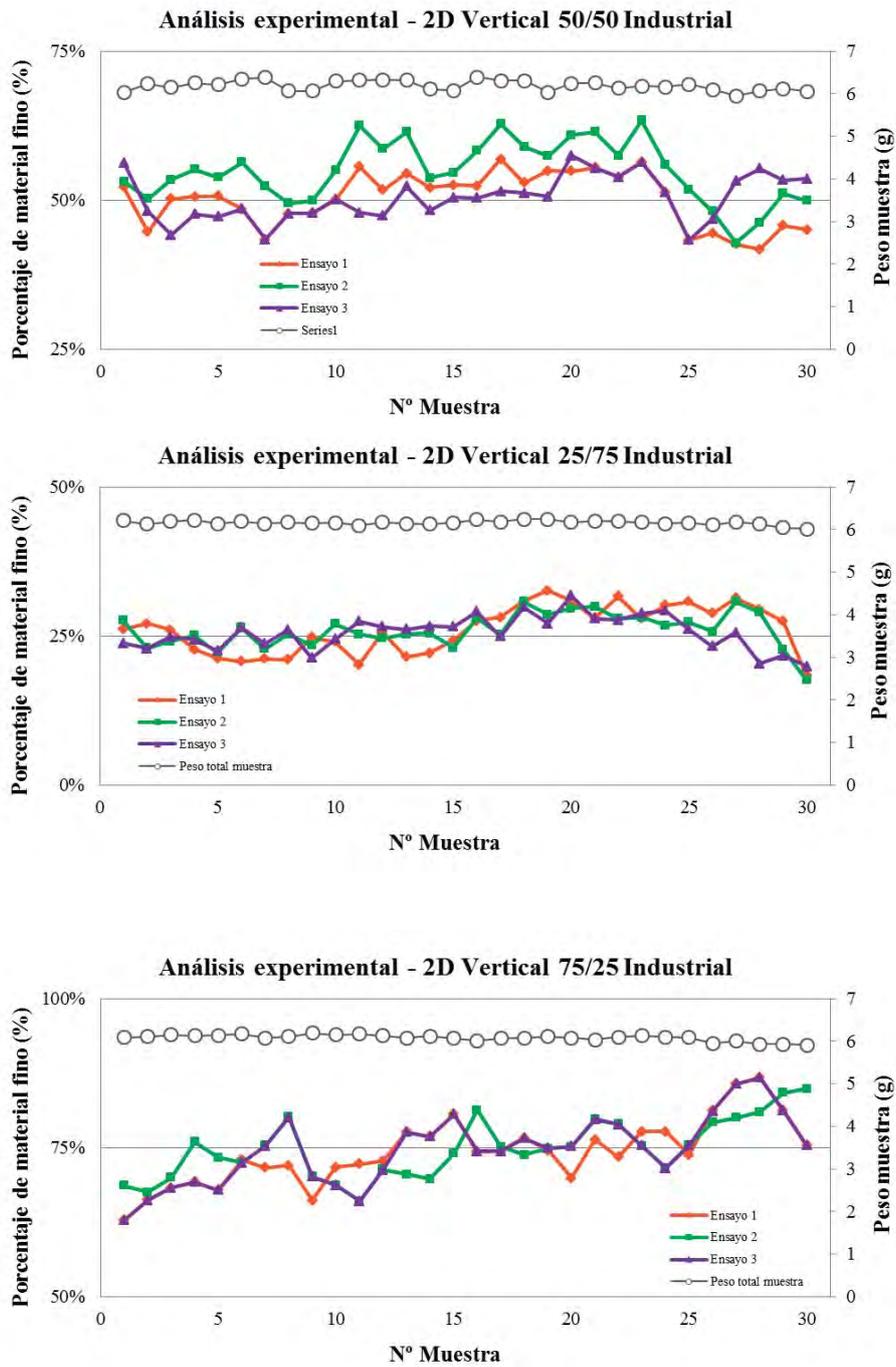


Figura 52. Resultados experimentales para la configuración 2D Vertical. Llenado industrial. Sémola-Sémola

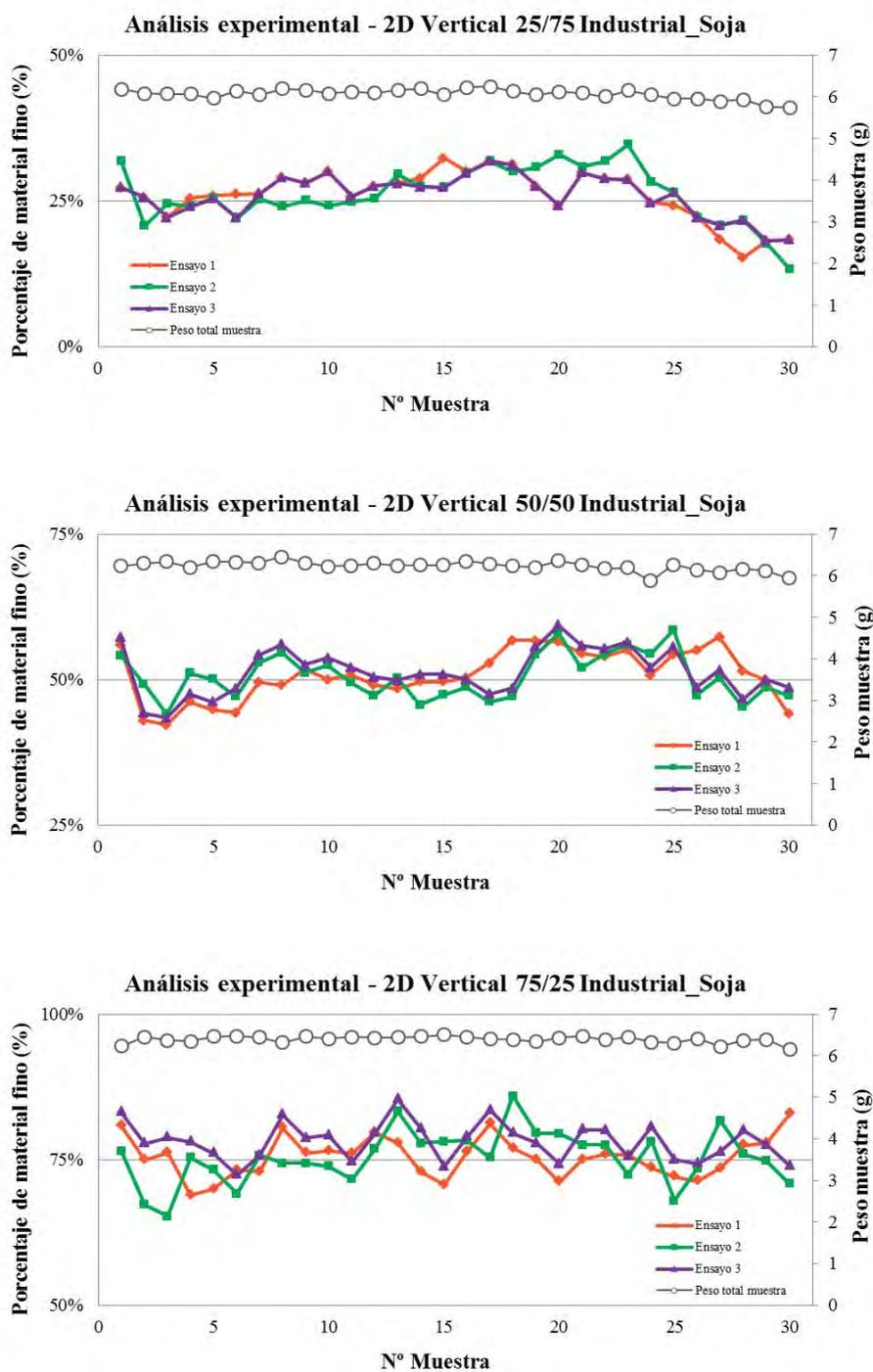


Figura 53. Resultados experimentales para la configuración 2D Vertical. Llenado industrial. Soja-Sémola

- **2D-Horizontal 25/75 Industrial** Este ensayo se realiza con el carro 2D configurado en la posición “Horizontal” tras ser llenado de forma “industrial” con una mezcla compuesta por 50 gramos de material fino y 150 gramos de material grueso. La situación inicial el carro alimentador se muestra en la Figura 54a.
- **2D-Horizontal 50/50 Industrial** En este ensayo se emplea la configuración “Horizontal” del “carro 2D” y se realiza el “llenado industrial” de una mezcla compuesta por 100 gramos de material fino y 100 gramos de material grueso. Tras el llenado, el carro alimentador se encuentra en la situación mostrada en Figura 54b.
- **2D-Horizontal 75/25 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “Horizontal” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 150 gramos de partículas finas y 50 gramos de partículas gruesas. En la Figura 54c se puede observar la situación inicial el carro alimentador.

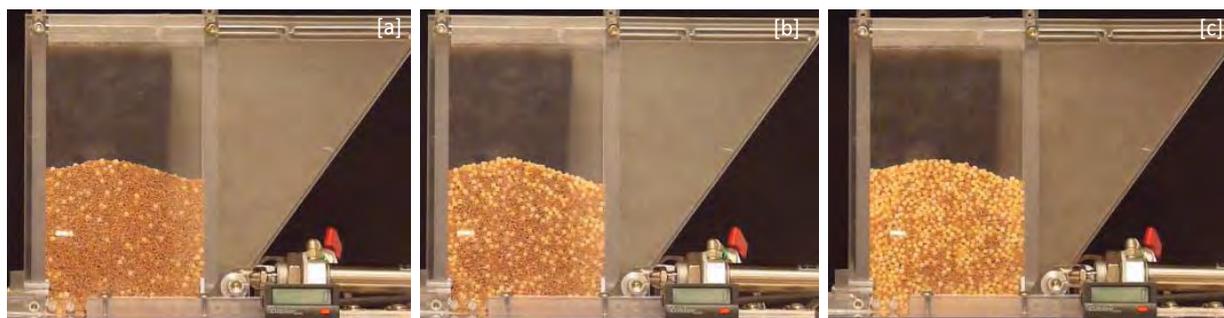


Figura 54. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo Sémola-Sémola 2D-Horizontal 25/75 Industrial (a), 2D-Horizontal 50/50 Industrial (b) y 2D-Horizontal 75/25 Industrial (c).

En la Figura 55 y Figura 56, se pueden comprobar las descargas muestra a muestra de estos ensayos y el peso medio de cada muestra.

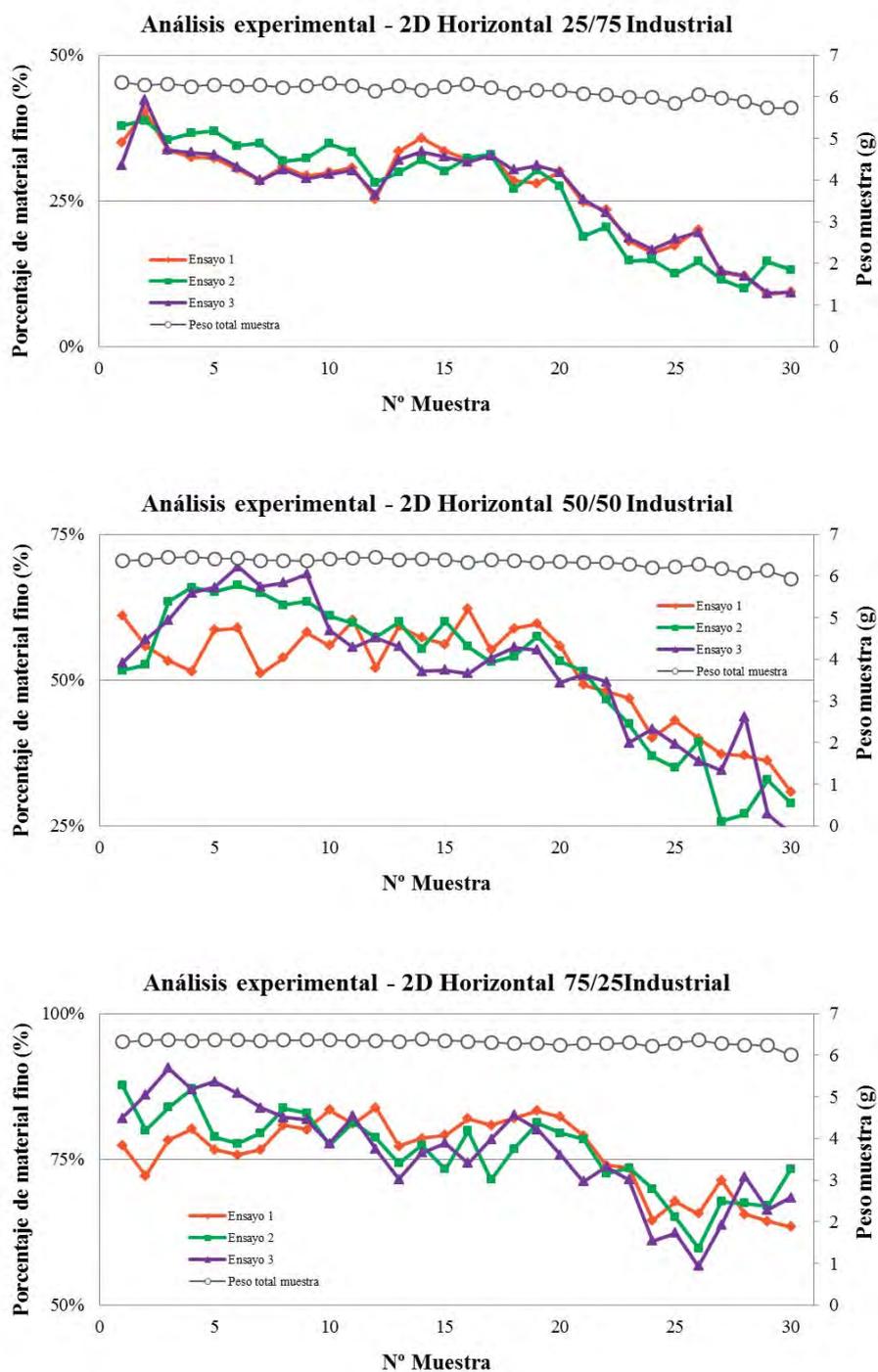


Figura 55. Resultados experimentales para la configuración 2D Horizontal. Llenado industrial. Sémola-Sémola

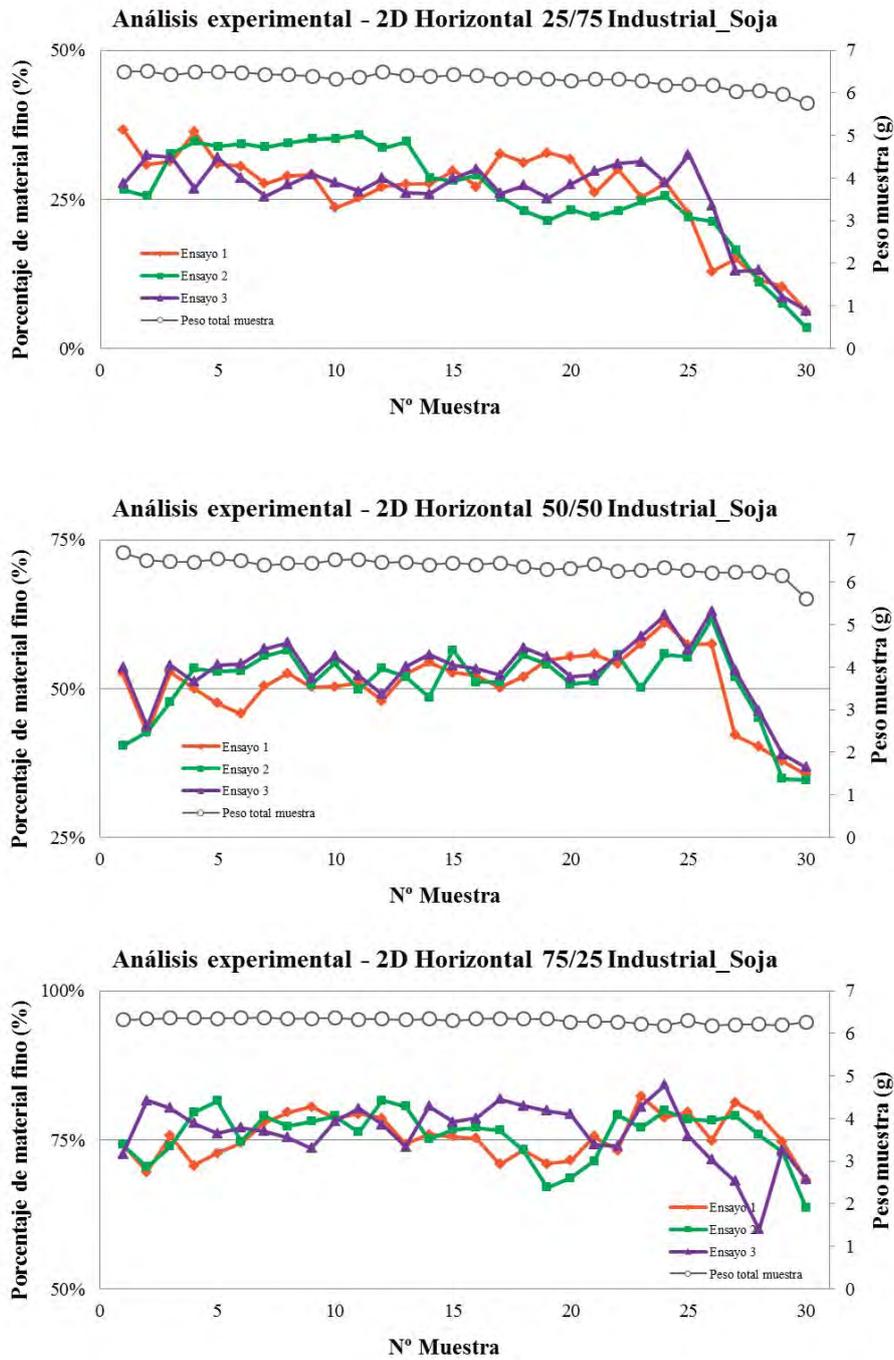


Figura 56. Resultados experimentales para la configuración 2D Horizontal. Llenado industrial. Sémola-Soja

Ic. **Llenado industrial carro 3D**. En esta fase se realizan ensayos usando un llenado industrial y un carro 3D para poder validar los parámetros de la simulación obtenidos con el modelo simplificado.

El llenado empleado para realizar estos ensayos es de tipo *industrial*, siendo la cantidad de material utilizada en estos ensayos de 400 gramos, formada por 100 gramos de material fino (25% en masa) y 300 gramos de material grueso (75% en masa).

- **3D-Vertical 25/75 Industrial** El ensayo se realiza con el *carro 3D* en posición *Vertical*, empleando un *llenado industrial* con una mezcla de 100 gramos de material fino y 300 gramos de material grueso.
- **3D-Horizontal 25/75 Industrial** En este ensayo se emplea la configuración *Horizontal* del *carro 3D*. El llenado del mismo es de tipo *industrial* y se emplea una mezcla total de 400 gramos, de los que 100 gramos son de material fino y 300 gramos de material grueso.

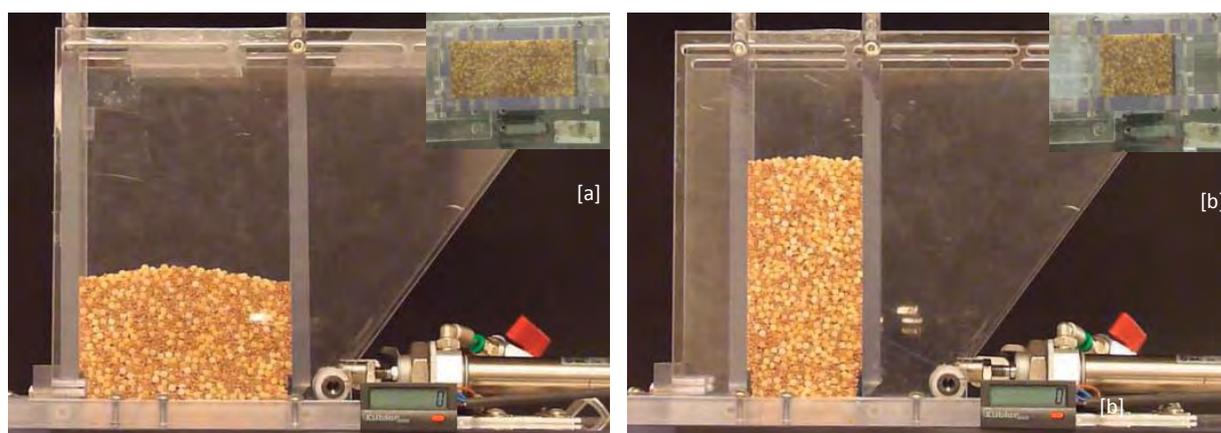


Figura 57. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo 3D-Horizontal 25/75 Industrial (a), 3D-Vertical 25/75 Industrial (b)

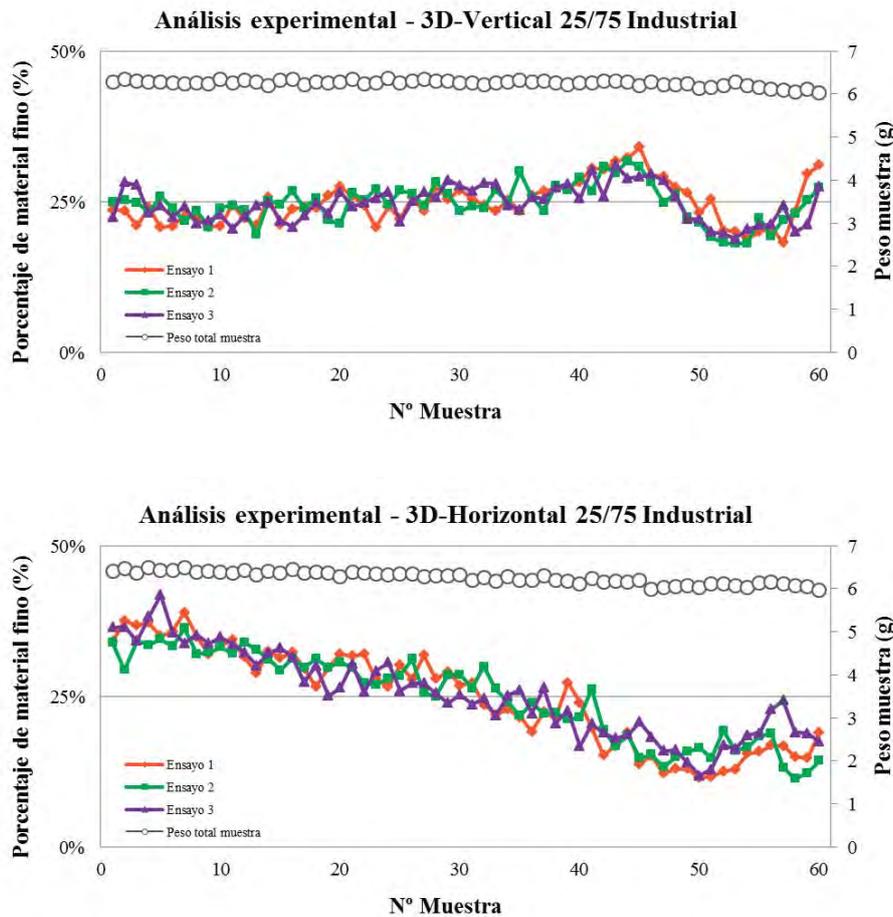


Figura 58. Resultados experimentales para la configuración 3D Horizontal y vertical. Llenado industrial.

Id. Llenado continuo. En esta fase se realizan ensayos reproduciendo la forma de llenado de las empresas (llenado continuo), pero con una configuración de carro sencilla para poder comprobar como los parámetros de la simulación son correctos.

En los ensayos de esta fase se realiza un “llenado industrial” inicial de 200 gramos y cinco llenados de 100 gramos a lo largo del ensayo (después de las muestras 15, 30, 45, 60 y 75). En todos los casos, la mezcla está compuesta por material fino en un 25% en masa con un 75% en masa de material grueso.

- **2D-Horizontal 25/75 continuo** Este ensayo se realiza con el “carro 2D” en posición “Horizontal”. El llenado del mismo se realiza con 200 gramos (50 gramos de material fino y 150 gramos de grueso) inicialmente (Figura 59) y con 100 gramos (25 gramos de partículas finas y 75 de gruesas) en las muestras 15, 30, 45, 60 y 75.

- **2D-Horizontal 50/50 continuo** Este ensayo se realiza con el “carro 2D” en posición “Horizontal”. El llenado del mismo se realiza con 200 gramos (100 gramos de material fino y 100 gramos de grueso) inicialmente (Figura 59) y con 100 gramos (50 gramos de partículas finas y 50 de gruesas) en las muestras 15, 30, 45, 60 y 75.
- **2D-Horizontal 72/25 continuo** Este ensayo se realiza con el “carro 2D” en posición “Horizontal”. El llenado del mismo se realiza con 200 gramos (50 gramos de material fino y 150 gramos de grueso) inicialmente (Figura 59) y con 100 gramos (75 gramos de partículas finas y 25 de gruesas) en las muestras 15, 30, 45, 60 y 75.

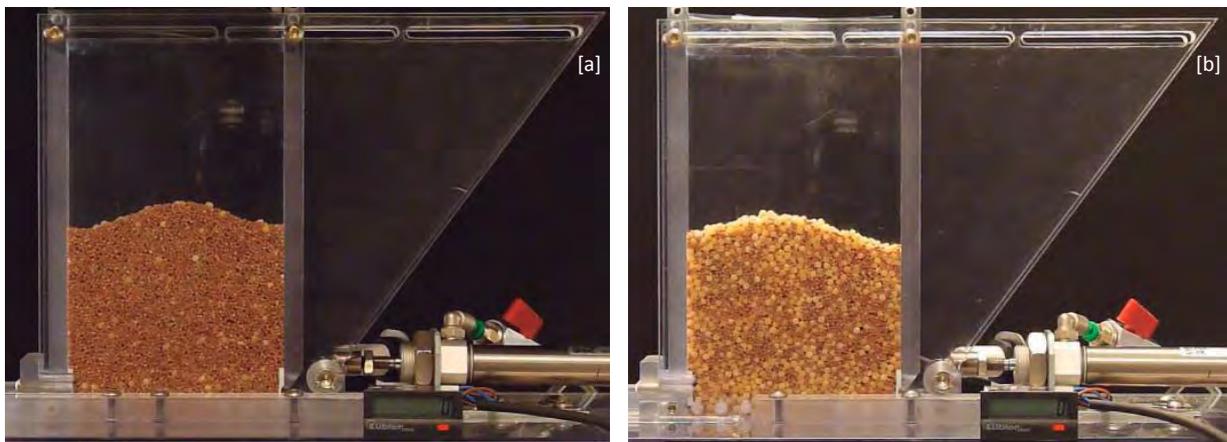


Figura 59. Situación inicial del carro alimentador en el ensayo 2D Horizontal 25/75 Industrial-continuo al inicio del ensayo (a), 2D Horizontal 75/25 Industrial (b), 2D Horizontal 25/75 Industrial

La evolución muestra a muestra de este ensayo puede observarse en la Figura 60.

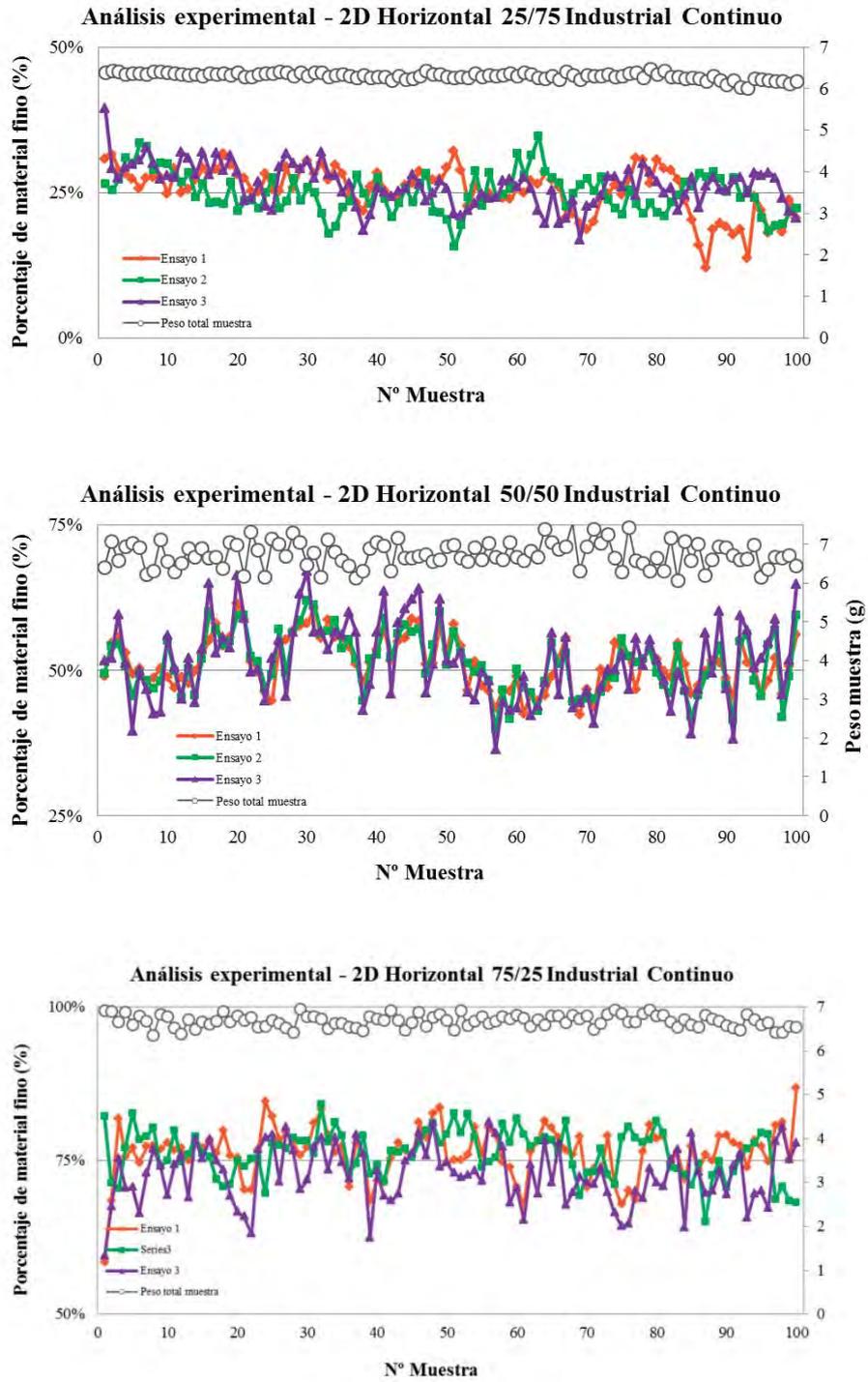


Figura 60. Resultados experimentales para la configuración 2D Horizontal. Llenado continuo.

5.2 FASE II Carro en forma de zapato.

En esta fase se ensayan los modelos de carro alimentador de tipo zapato con el llenado industrial y se analizan los efectos de la segregación, en busca de la mejor configuración de carro que ayude a minimizar el fenómeno de segregación a la par que se validan los parámetros de la simulación en las diferentes configuraciones de “zapato”.

La cantidad de material empleado en estos ensayos es de 200 gramos, fraccionándose en distintas proporciones: 25% en masa de material fino (50 gramos) y 75% en masa de material grueso (150 gramos), 50% de material fino y 50% de material grueso (100 gramos de cada componente) y 75% de fino (150 gramos) y 25% de grueso (50 gramos).

- **2H-143 25/75 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “2H-143” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 150 gramos de partículas finas y 50 gramos de partículas gruesas. En la Figura 61a se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **2H-143 50/50 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “2H-143” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 100 gramos de partículas finas y 100 gramos de partículas gruesas. En la Figura 61b se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **2H-143 75/25 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “2H-143” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 150 gramos de partículas finas y 50 gramos de partículas gruesas. En la Figura 61c se puede observar la situación inicial el carro alimentador.



Figura 61. Situación inicial del carro alimentador en la posición 2D 2H-143 25/75 Industrial (a), 2D 2H-143 50/50 Industrial (b) 2D 2H-143 75/25 Industrial (c)

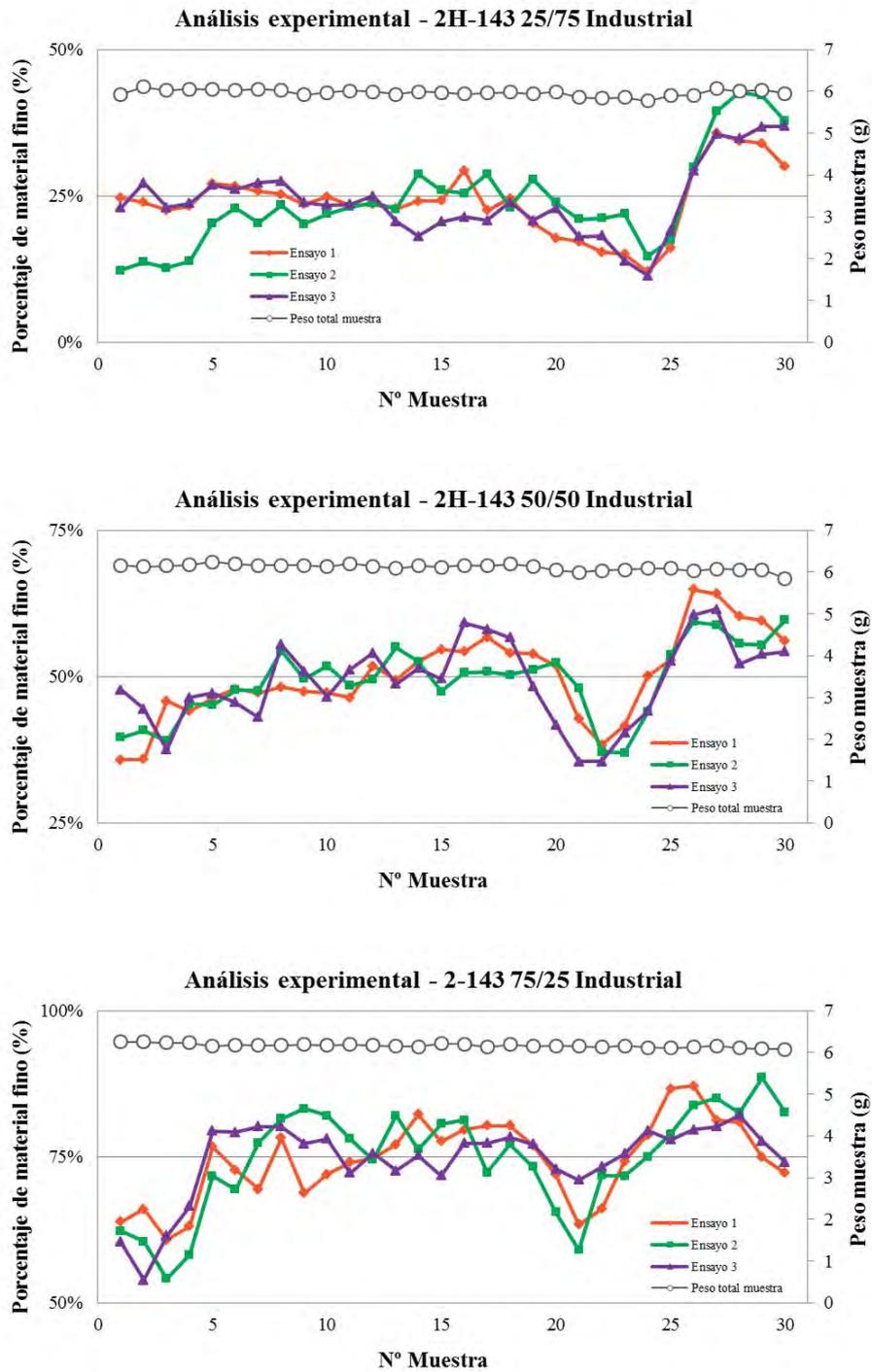


Figura 62. Resultados experimentales para la configuración 2H-143. Llenado industrial

En la Figura 62 se pueden analizar la evolución de la descarga muestra a muestra.

- **1V-130 25/75 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “1V-130” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 150 gramos de partículas finas y 50 gramos de partículas gruesas. En la Figura 63a se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **1V-130 50/50 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “1V-130” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 100 gramos de partículas finas y 100 gramos de partículas gruesas. En la Figura 63b se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **1V-130 75/25 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “1V-130” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 50 gramos de partículas finas y 150 gramos de partículas gruesas. En la Figura 63c se puede observar la situación inicial el carro alimentador.



Figura 63. Situación inicial del carro alimentador en la posición 2D 1V-130 25/75 Industrial (a), 2D 1V-130 50/50 Industrial (b) 2D 1V-130 75/25 Industrial (c)

La evolución muestra a muestra de la descarga de este ensayo, puede observarse en la Figura 64.

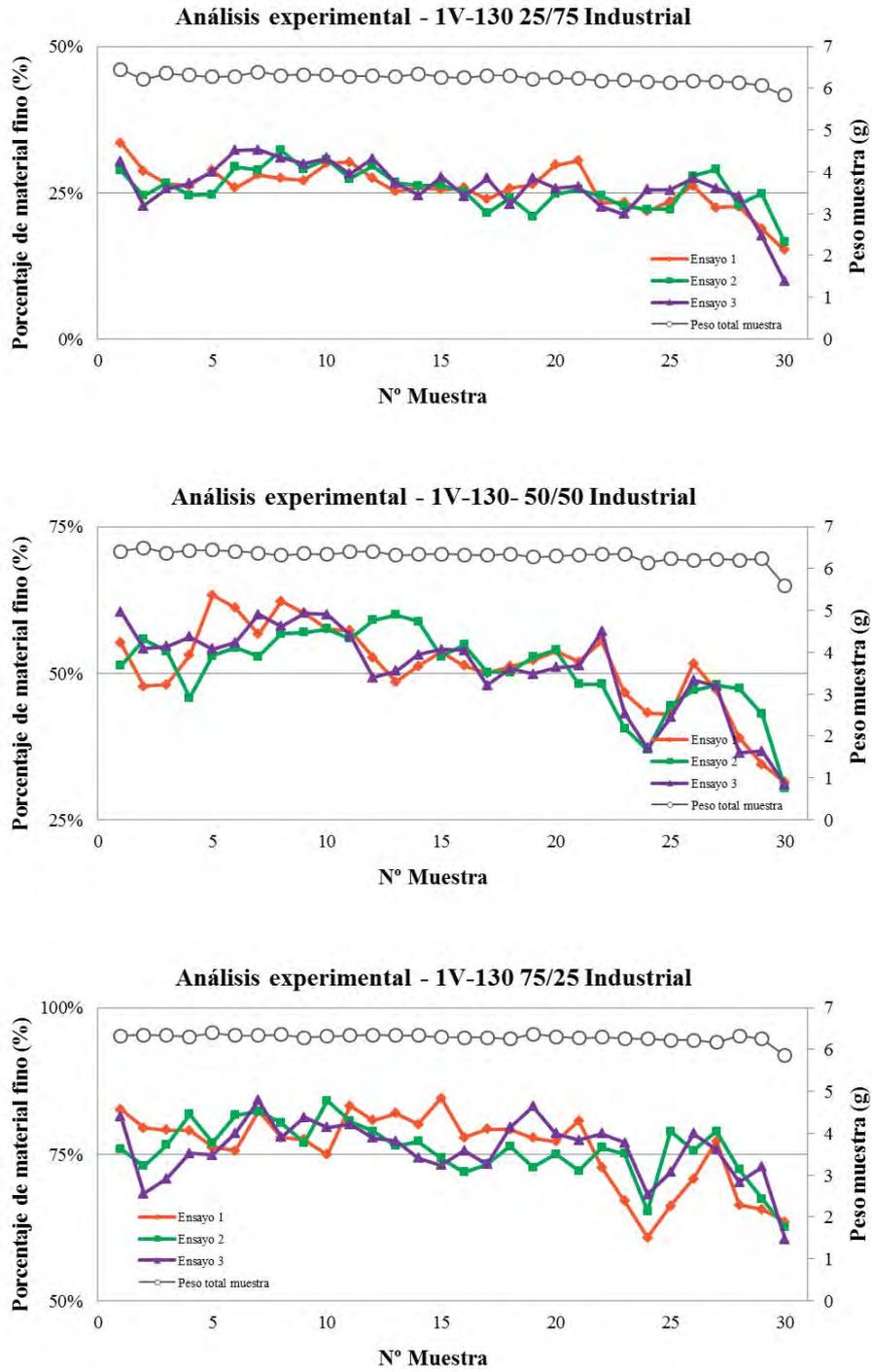


Figura 64. Resultados experimentales para la configuración IV-130. Llenado industrial

- **2V-120 25/75 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “2V-120” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 150 gramos de partículas finas y 50 gramos de partículas gruesas. En la Figura 65a se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **2V-120 50/50 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “2V-120” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 100 gramos de partículas finas y 100 gramos de partículas gruesas. En la Figura 65b se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **2V-120 75/25 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “2V-120” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 50 gramos de partículas finas y 150 gramos de partículas gruesas. En la Figura 65c se puede observar la situación inicial el carro alimentador.



Figura 65. Situación inicial del carro alimentador en la posición 2D 2V-120 25/75 Industrial (a), 2D 2V-120 50/50 Industrial (b) 2D 2V-120 75/25 Industrial (c)

La Figura 66 muestra la evolución muestra a muestra de la descarga de este ensayo.

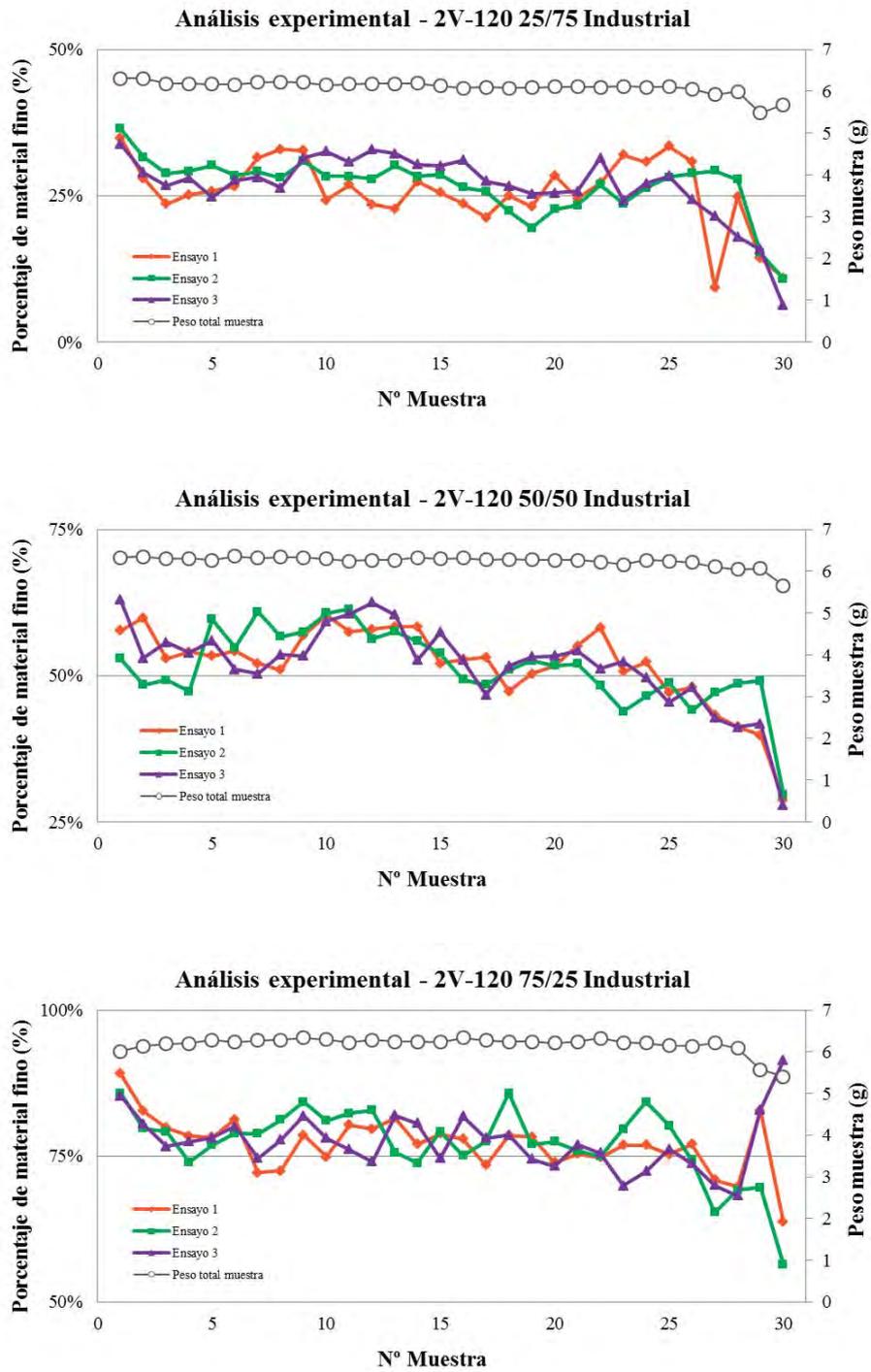


Figura 66. Resultados experimentales para la configuración 2V-120. Llenado industrial

- **4V-120 25/75 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “4V-120” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 150 gramos de partículas finas y 50 gramos de partículas gruesas. En la Figura 67a se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **4V-120 50/50 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “4V-120” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 100 gramos de partículas finas y 100 gramos de partículas gruesas. En la Figura 67b se puede observar la situación inicial el carro alimentador.
- **4V-120 75/25 Industrial** Para realizar este ensayo se configura el “carro 2D” en la posición “4V-120” y se llena de forma “industrial” con una mezcla de 50 gramos de partículas finas y 150 gramos de partículas gruesas. En la Figura 67c se puede observar la situación inicial el carro alimentador.



Figura 67. Situación inicial del carro alimentador en la posición 2D 4V-120 25/75 Industrial (a), 2D 4V-120 50/50 Industrial (b) 2D 4V-120 75/25 Industrial (c)

Como en casos anteriores, la Figura 68 se puede observar la descarga de las diferentes con el carro “4V-120”.

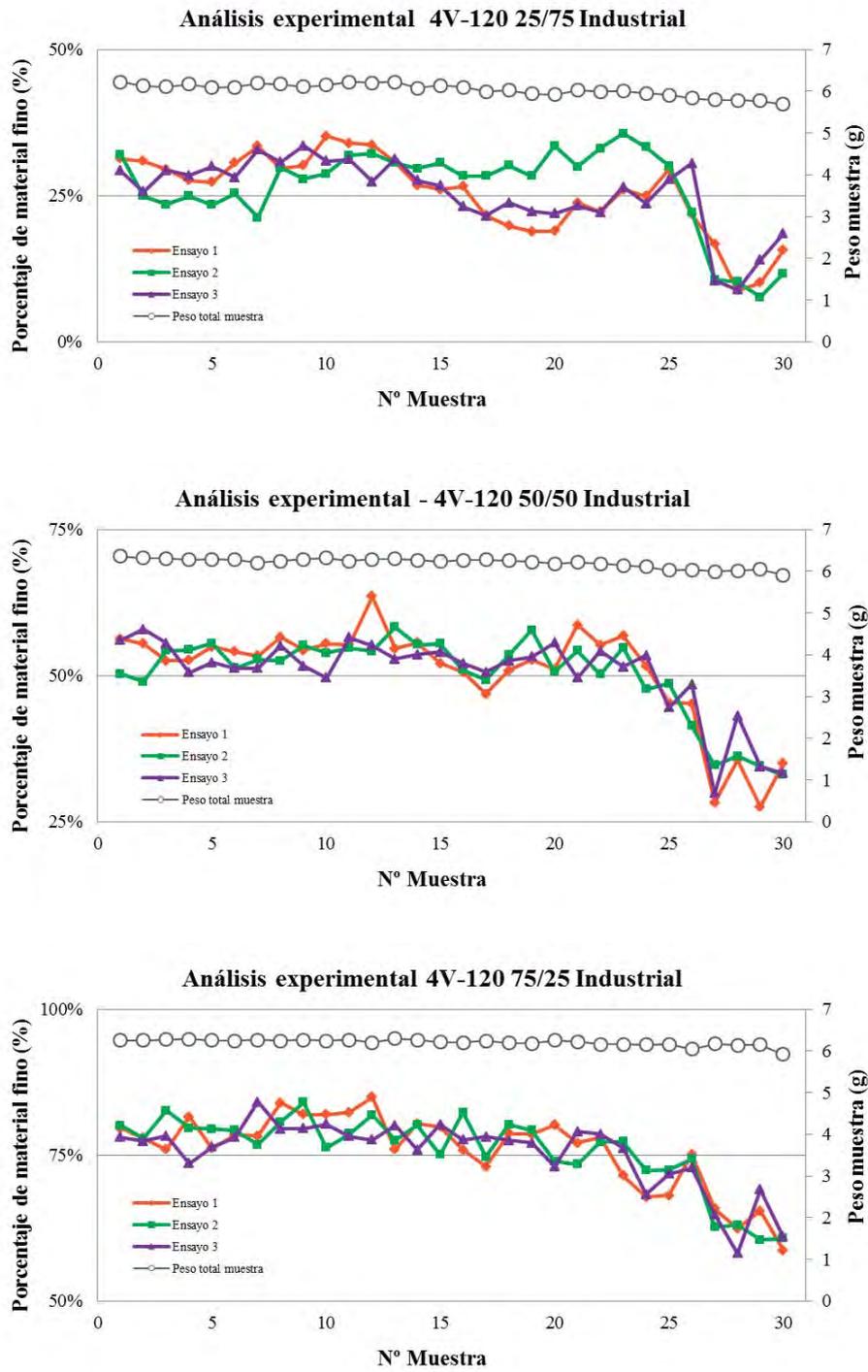


Figura 68. Resultados experimentales para la configuración 4V-120. Llenado industrial.

- **3D 2V-120 25/75 Industrial.** Como en la fase anterior se realizan ensayos con el carro en posición 2V-120, pero con la anchura correspondiente a al modelo 3D.

El llenado empleado para realizar estos ensayos es de tipo “industrial”, siendo la cantidad de material utilizada en estos ensayos de 400 gramos, formada por 100 gramos de material fino (25% en masa) y 300 gramos de material grueso (75% en masa). En la Figura 69 se puede observar la situación inicial el carro alimentador.

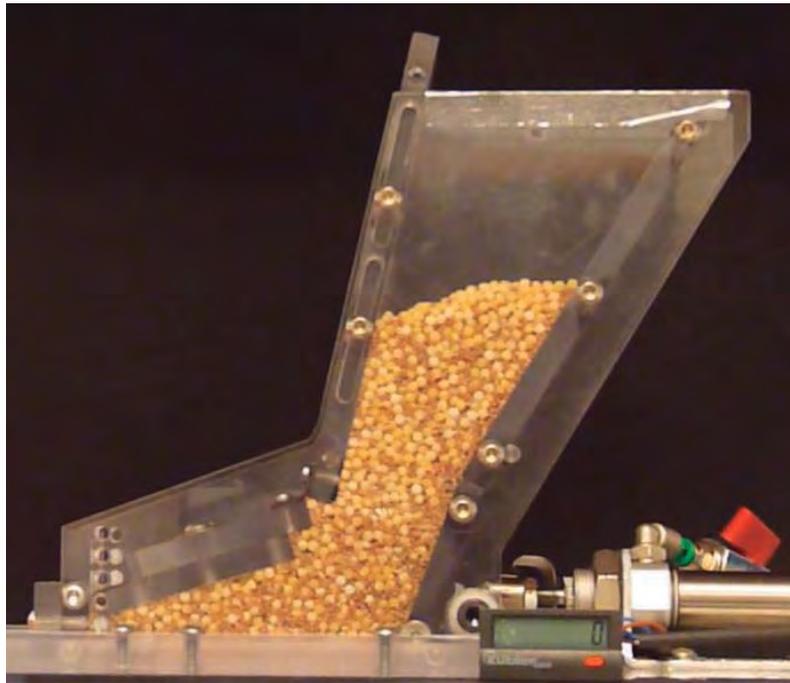


Figura 69. Situación inicial del carro alimentador en la posición 3D 2V-120 25/75 Industrial.

En las Figura 70 y Figura 71, se pueden observar las descargas de los carros “3D” y “2D llenado continuo”.

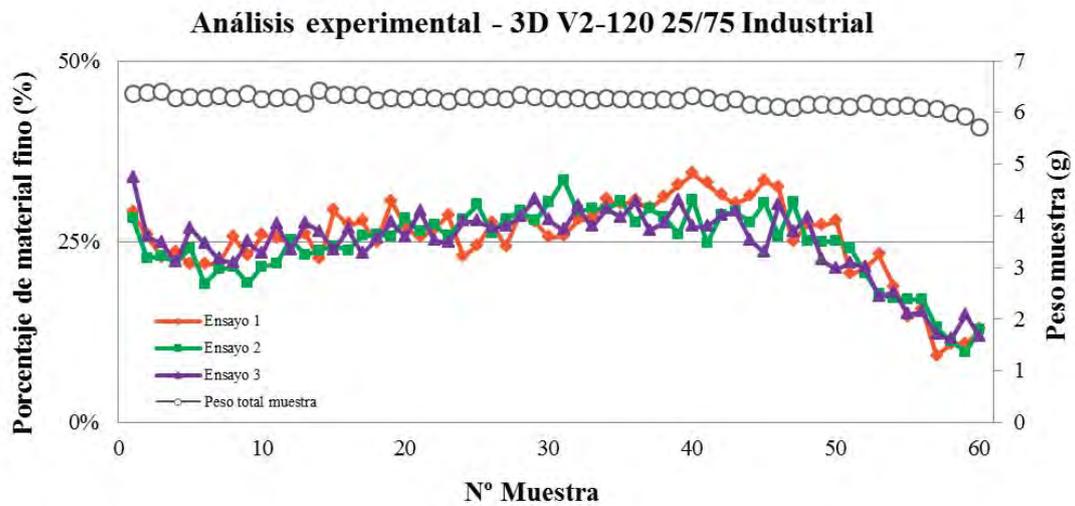


Figura 70. Resultados experimentales para la configuración 3D 2V-120. Llenado industrial

- 2D 2V-120 25/75 Industrial Continuo. En los ensayos de esta fase se realiza un “llenado industrial” inicial de 200 gramos y cinco llenados de 100 gramos a lo largo del ensayo (después de las muestras 15, 30, 45, 60 y 75). En todos los casos, la mezcla está compuesta por material fino en un 25% en masa con un 75% en masa de material grueso.

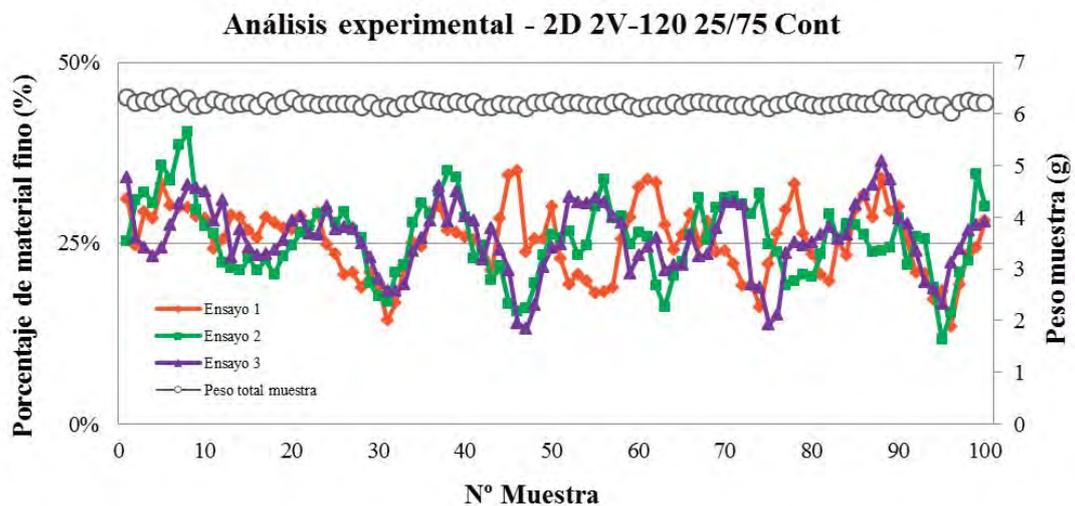


Figura 71. Resultados experimentales para la configuración 2D 2V-120. Llenado continuo.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

6 RESULTADOS

6.1 Simulaciones y comparación de resultados

6.1.1 FASE I. Carro simplificado. Ajuste de parámetros.

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en los ensayos empíricos realizados en esta primera fase, obteniendo los primeros ajustes de los parámetros de simulación.

6.1.1.1 *Ia. Llenado por capas*

6.1.1.1.1 2D V 90 2 Capas Sémola-Sémola

En la imagen se puede observar la situación inicial de este ensayo. Para realizar este ensayo se ha usado un “carro vertical” y se ha llenado “por capas”, para minimizar el efecto de la segregación que se introduce en un llenado industrial.



Figura 72. Situación inicial en el ensayo 2D Vertical. Llenado 2 capas. Sémola – Sémola.

En la Figura 73 se muestra los porcentajes de material fino que componen cada comprimido (media de las pruebas experimentales) contra la simulación. En esta gráfica también se puede ver el peso de cada muestra en este ensayo.

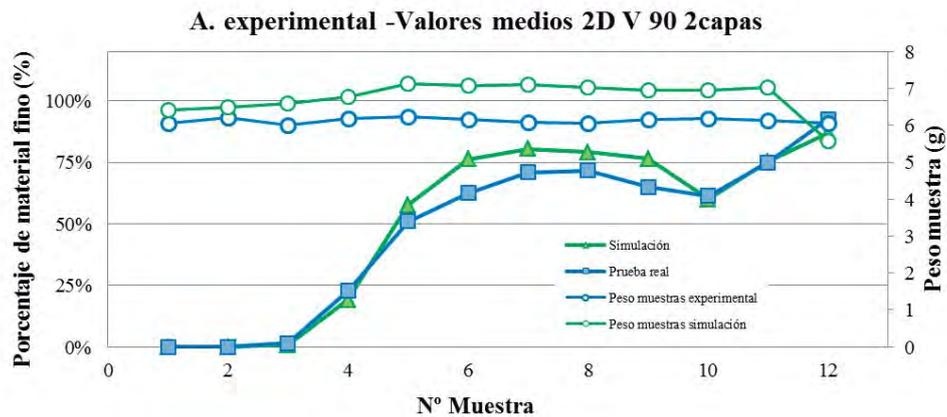


Figura 73. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 2 capas. Sémola-Sémola.

Analizando la curva de segregación, se puede observar que en los primeros comprimidos el porcentaje de material fino es nulo. Esto es debido a la metodología de llenado, ya que las partículas finas se han colocado en la capa superior, por lo que como cabía esperar los primeros comprimidos solo están formados de partículas gruesas.

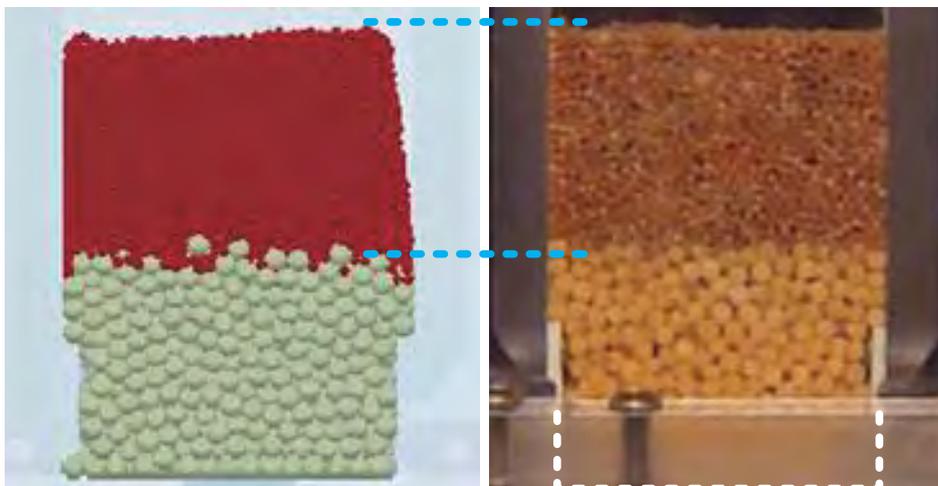


Figura 74. Comparativa entre simulación y experimental. 2D Vertical 90 2Capas. Sémola Sémola. Estado inicial

Este mismo fenómeno se extiende hasta el comprimido 3, como se puede observar en la Figura 73.

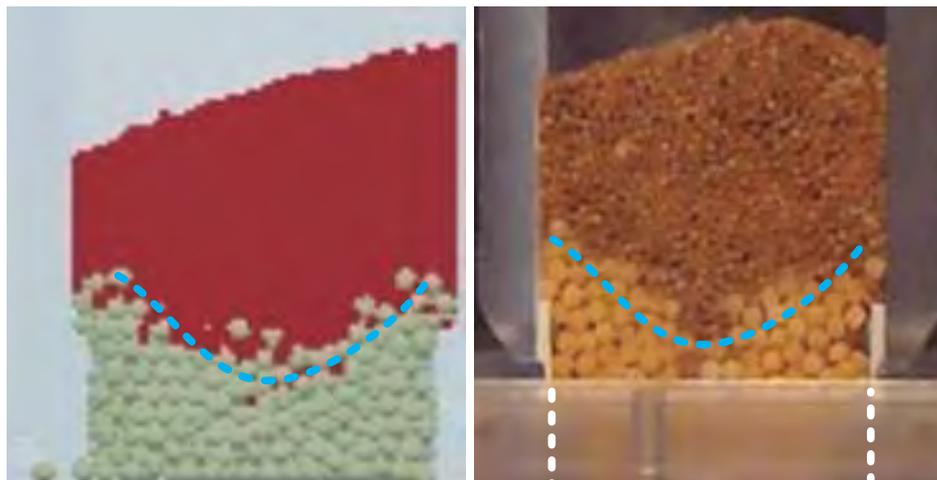


Figura 75. Comparativa entre simulación y experimental.2D Vertical 90 2Capas. Sémola Sémola. Muestra 1.

Más allá del comprimido 3, se observa un incremento en el porcentaje de material fino en la gráfica, que también se puede observar en la simulación. En la Figura 76 se puede observar el flujo de conducto, donde las partículas gruesas se apartan para dejar pasar a las finas.

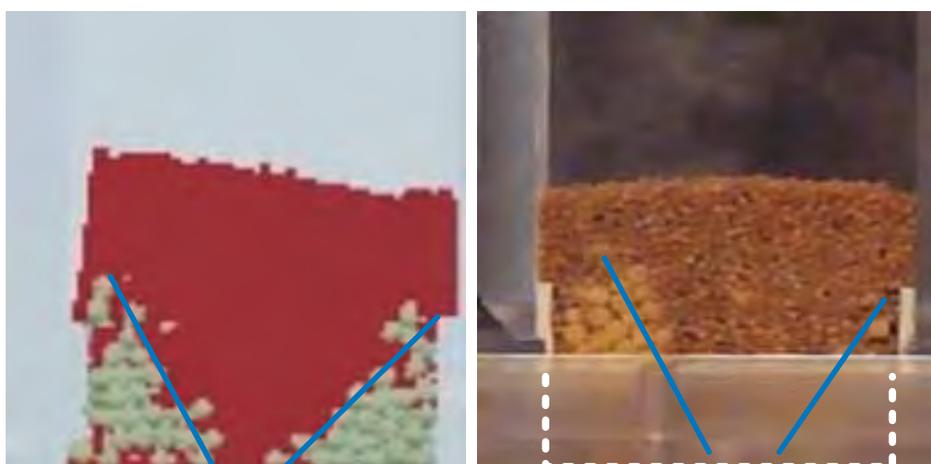


Figura 76. Comparativa entre simulación y experimental.2D Vertical 90 2Capas. Sémola Sémola. Muestra 5.

En el comprimido duodécimo, se puede observar una bajada brusca de material fino. Este fenómeno se puede explicar ya que una pequeña bolsa de partículas gruesas cae dentro de la matriz.



Figura 77. Simulación.2D Vertical 90 2Capas. Sémola Sémola. Muestra 10.

Pasado este comprimido, la matriz continua llenándose de las partículas remanentes del carro que es su mayoría son partículas finas.

6.1.1.1.2 2D V 90 4 Capas Sémola Sémola

En la siguiente figura se puede observar la situación inicial de la prueba de llenado por 4 capas con carro vertical.



Figura 78 .Situación inicial en el ensayo 2D Vertical. Llenado 4 capas. Sémola – Sémola.

Observando la Figura 79 y Figura 80, y como ya pasaba con la prueba anterior, el primer comprimido está formado por solo partículas gruesas debido a la forma de llenado.

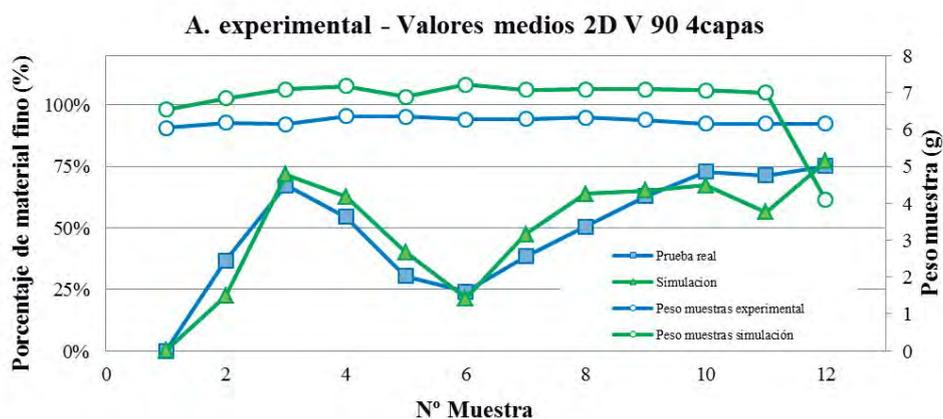


Figura 79. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 4 capas. Sémola-Sémola.

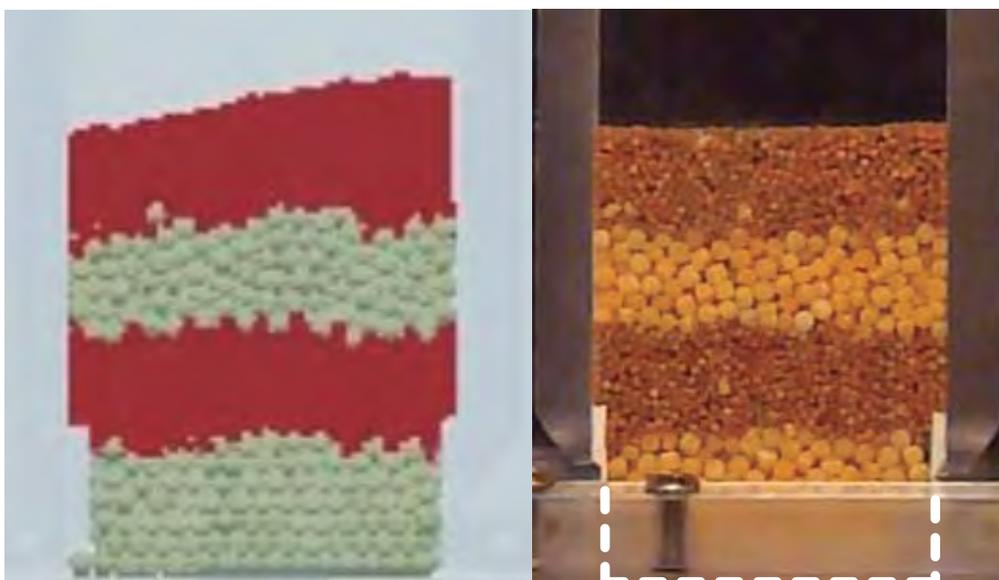


Figura 80. Prueba experimental vs simulación. 2D Vertical 90 4Capas. Sémola Sémola. Estado inicial.

Más adelante, se crea un flujo de conducto donde las partículas gruesas se apartan para dejar pasar las finas como se puede observar en la Figura 81.

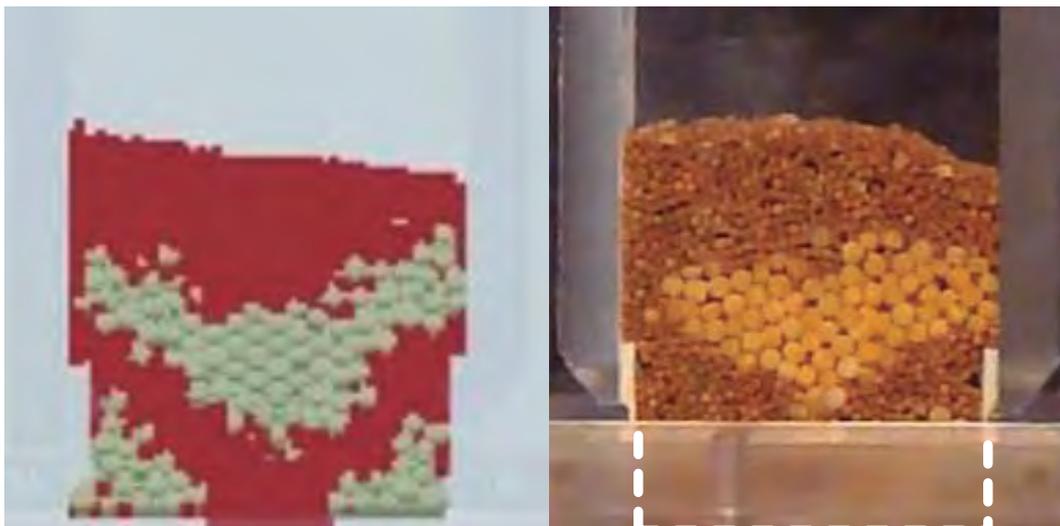


Figura 81. Prueba experimental vs simulación. 2D Vertical 90 4Capas. Sémola Sémola. Muestra 3.

Y cuando las partículas finas de esta zona se acaban, vuelven a aparecer las gruesas como se puede observar en la Figura 82 y en el comprimido 6 de la Figura 79.

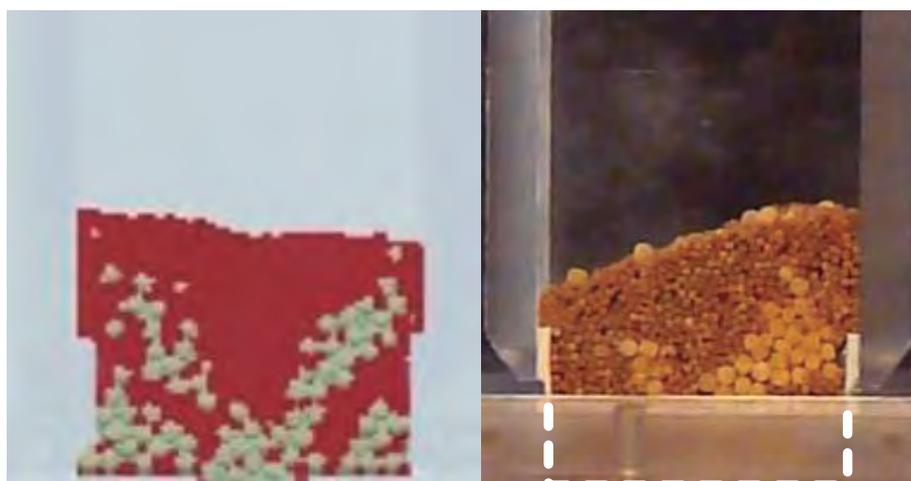


Figura 82. Prueba experimental vs Simulación. 2D Vertical 90 4Capas. Sémola Sémola. Muestra 6.

Como resumen, se puede explicar que primero hay una descarga muy brusca de las partículas finas que es seguida de la descarga de partículas gruesas. La diferencia de el llenado en dos capas o en cuatro, es que en el llenado en cuatro capas este efecto se repite dos veces, mientras que en el llenado en dos capas solo se produce una vez.

6.1.1.1.3 2D H 90 2 Capas Sémola Sémola

En la Figura 83 se puede observar la situación inicial de este ensayo con un carro horizontal llenado por 2 capas de sémola.



Figura 83 .Situación inicial en el ensayo 2D Horizontal. Llenado 4 capas. Sémola – Sémola.

Como en casos anteriores y dado a que las partículas gruesas se han colocado en la parte inferior del carro durante en el llenado, esto hace que no haya ninguna partícula fina en el primer comprimido.

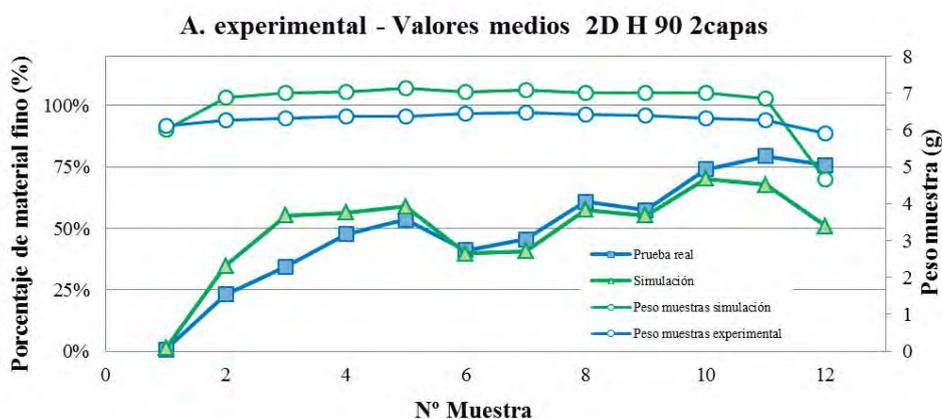


Figura 84. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 2 capas. Sémola-Sémola.

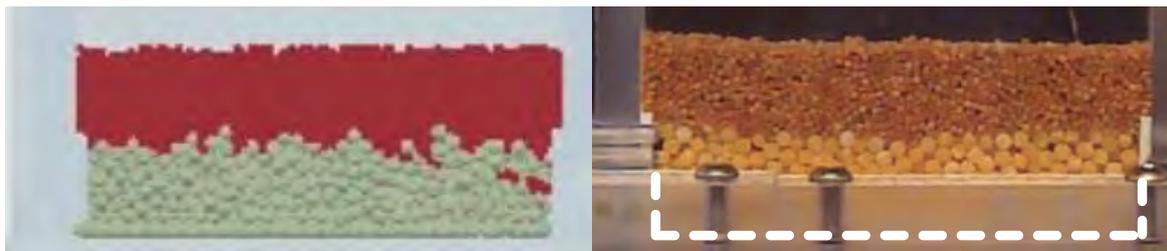


Figura 85. Simulación 2D Horizontal 90 2Capas. Sémola Sémola. Estado inicial.

Más tarde y como en otros ensayos, se produce un flujo de descarga que sumado al movimiento alternativo del carro hace que se generen dos bolsas de partículas gruesas como se puede observar en la Figura 86.

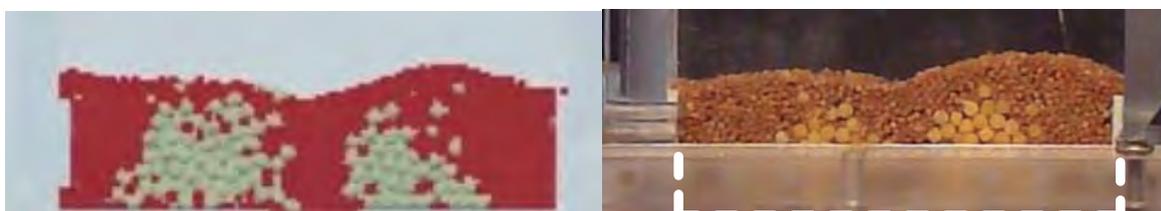


Figura 86. Simulación 2D Horizontal 90 2 Capas. Sémola Sémola. Muestra 4.

Cuando uno de esos bolsas es consumida por la matriz, se produce un descenso de concentración de partículas finas (la matriz se llena de partículas gruesas). Esto sucede en el comprimido numero 6 como se puede observar en la Figura 84 y Figura 87.



Figura 87. Simulación 2D Horizontal 90 2 Capas. Sémola Sémola. Muestra 6.

6.1.1.1.4 2D H 90 4 Capas Sémola Sémola

En esta prueba la situación inicial es un llenado en 4 capas usando un carro horizontal, donde el movimiento horizontal de las partículas debido al movimiento alternativo es mas libre.



Figura 88 .Situación inicial en el ensayo 2D Vertical. Llenado 4 capas. Sémola – Sémola

En esta prueba y debido a la libertad que poseen las partículas, el vaciado no es tan ordenado como en el case del carro vertical aunque se pueden observar los mismos fenómenos.

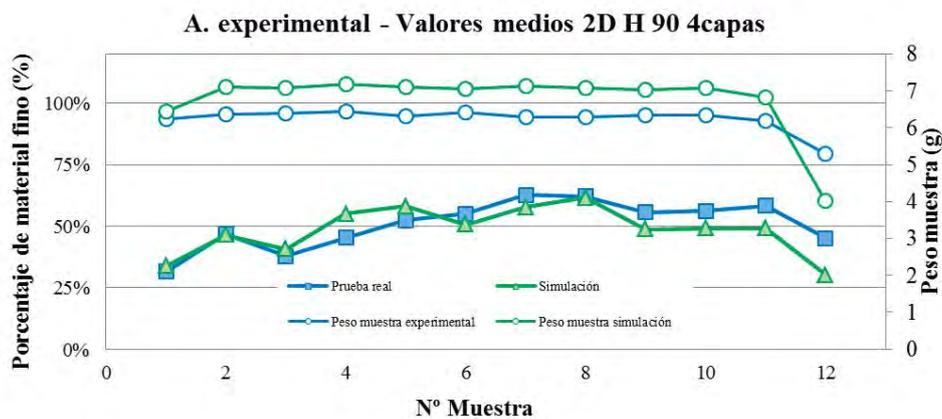


Figura 89. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 4 capas. Sémola-Sémola.

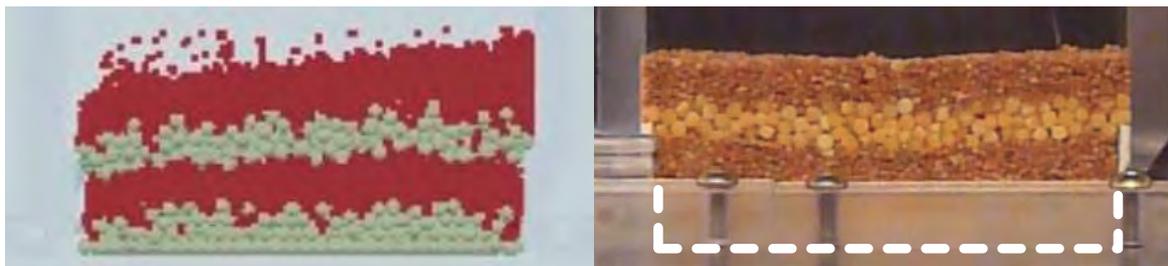


Figura 90. Simulación 2D Horizontal 90 4 Capas. Sémola Sémola. Estado inial.

Al comienzo se produce una descarga mayoritariamente de partículas finas, dejando dos bolsas de partículas gruesas.



Figura 91. Simulación 2D Horizontal 90 4 Capas. Sémola Sémola. Muestra 3.

Esas bolsas vuelven a mezclarse con las partículas finas debido al movimiento alternativo antes se ser consumidas por la matriz, por lo que en esta ocasión no se produce ese descenso tan acusado de partículas finas.



Figura 92. Simulación 2D Horizontal 90 4 Capas. Sémola Sémola. Muestra 8.

6.1.1.1.5 2D V 90 2 Capas Sémola Soja

Es este otro grupo de pruebas, se ha vuelto a repetir los mismos ensayos que en el bloque anterior pero con otros ingredientes.

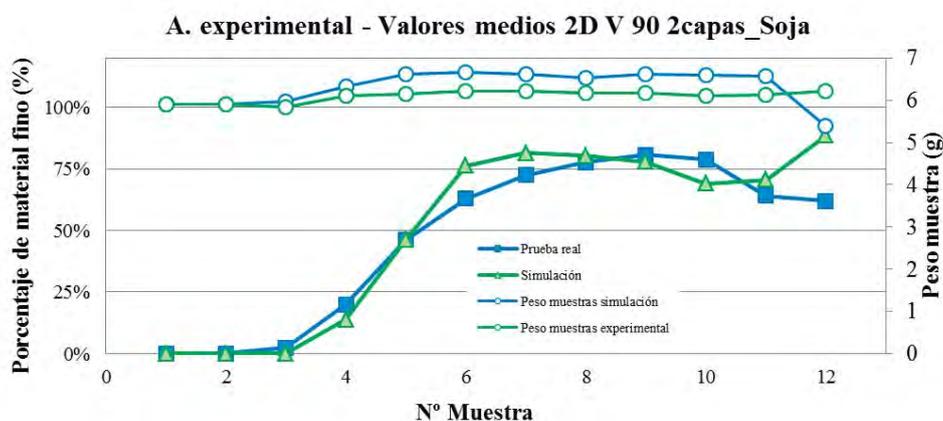


Figura 93. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 4 capas. Sémola-Sémola.



Figura 94. Simulación 2D Vertical 90 2 Capas. Sémola Soja. Estado inicial.

Como en el caso anterior, se han colocado las partículas gruesas en la base del carro, colocando sobre ellas las partículas finas.

Conforme se va vaciando el depósito se puede observar que en este caso también se forma un flujo de conducto, donde las partículas gruesas dejan pasar a las finas. (Figura 95)

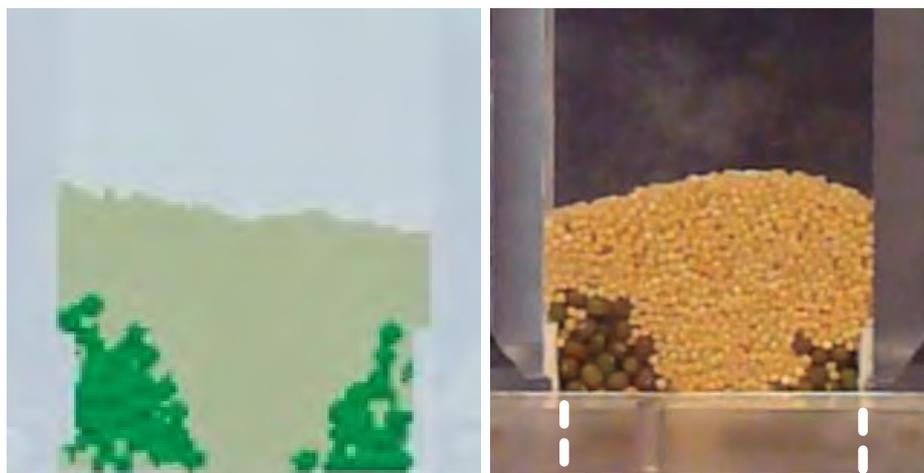


Figura 95. Simulación 2D Vertical 90 2 Capas. Sémola Soja. Muestra 6.

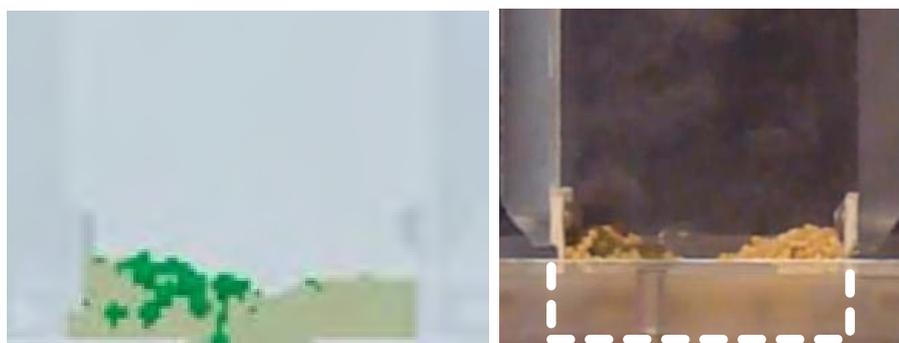


Figura 96. Simulación 2D Vertical 90 2 Capas. Sémola Soja. Muestra 11.

6.1.1.1.6 2D V 90 4 Capas Sémola Soja

La siguiente prueba se realiza usando el mismo carro en posición vertical, pero llenándolo por cuatro capas de material perfectamente sedimentado y segregado. Primero se ha colocado una capa de partículas gruesas, sobre ella una de finas y otras dos capas (gruesas y finas sucesivamente).

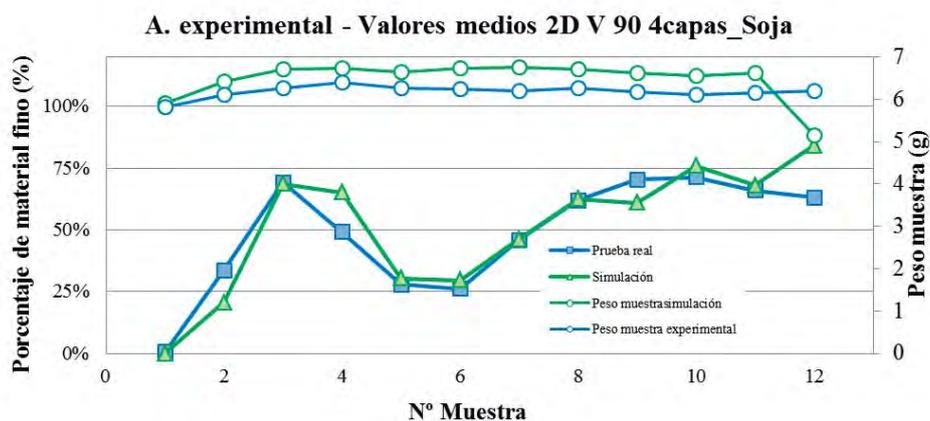


Figura 97. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 4 capas. Sémola-Sémola.

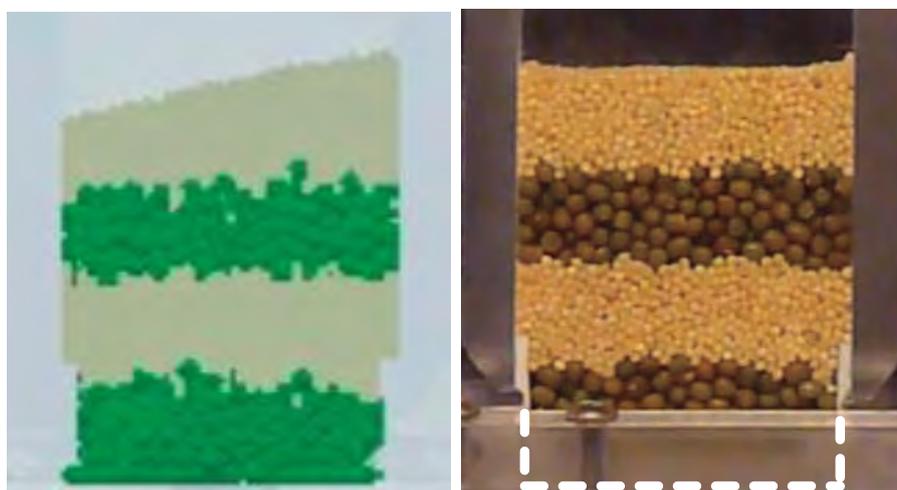


Figura 98. Simulación 2D Vertical 90 4 Capas. Sémola Soja. Estado inicial

Como en el caso del ensayo de las partículas de sémola, en ese caso también se produce un flujo de conducto haciendo que se produzcan dos remontes de material fino en la Figura 97, uno por cada capa de material fino.

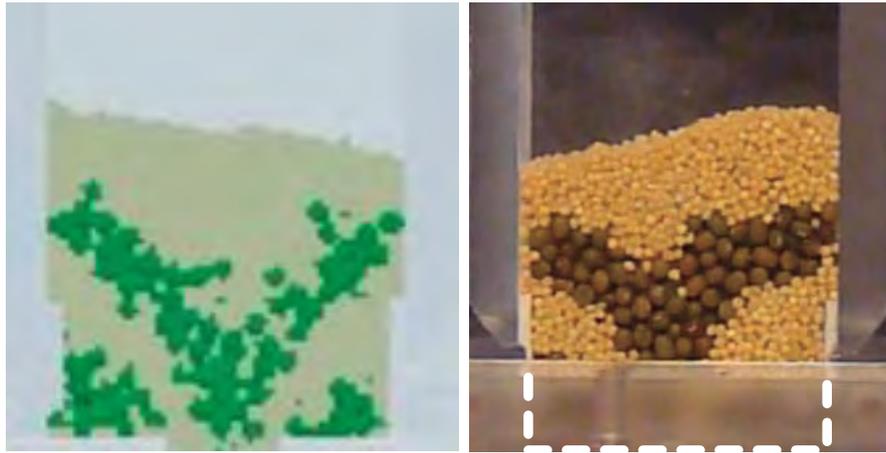


Figura 99. Simulación 2D Vertical 90 4 Capas. Sémola Soja. Muestra 4.

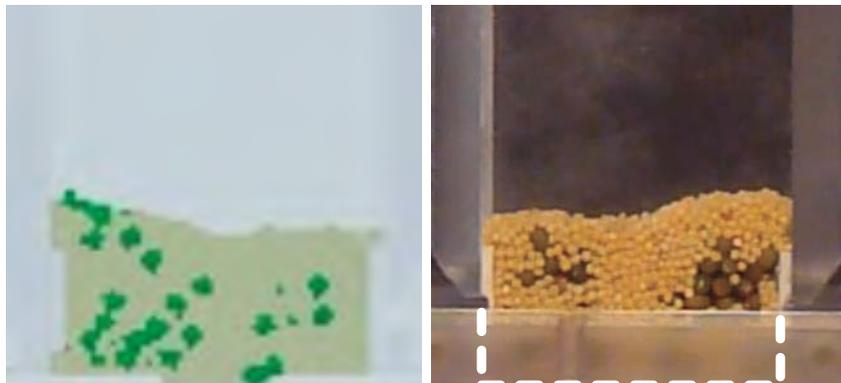


Figura 100. Simulación 2D Vertical 90 4 Capas. Sémola Soja. Muestra 8.

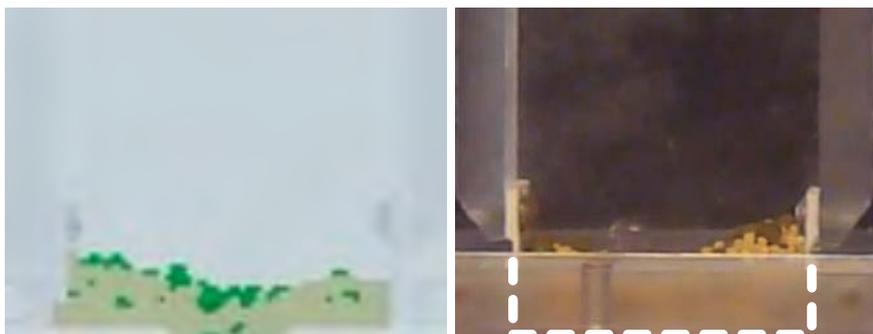


Figura 101. Simulación 2D Vertical 90 4 Capas. Sémola Soja. Muestra 11.

6.1.1.1.7 2D H 90 2 Capas Sémola Soja

Como en la prueba con sémola, el carro horizontal se llena con una capa de soja sobre la que se coloca otra de mijo.

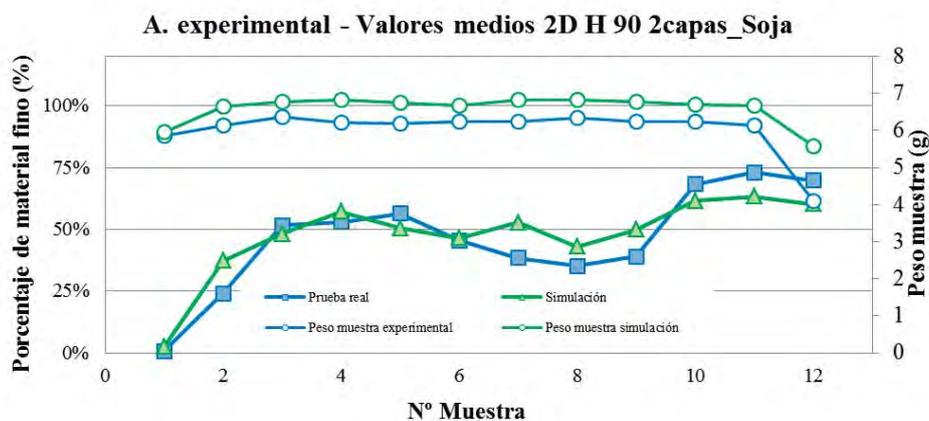


Figura 102. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 4 capas. Sémola-Sémola.

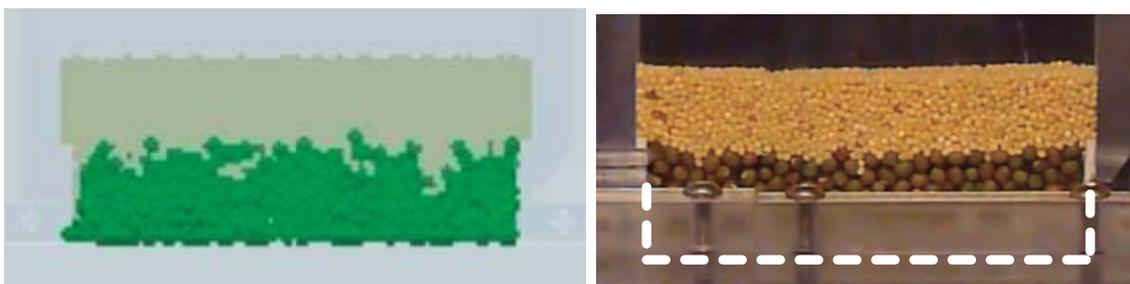


Figura 103. Simulación 2D Horizontal 90 2 Capas. Sémola Soja. Situación inicial.

El primer comprimido está formado por solo partículas gruesas, para pasar a formarse un flujo de conducto. El flujo de conducto forma dos bolsas de partículas gruesas (Figura 104) que se mueven con el movimiento alternativo del carro hasta que son atrapadas por la matriz (Figura 105).



Figura 104. Simulación 2D Horizontal 90 2 Capas. Sémola Soja. Muestra 3.



Figura 105. Simulación 2D Horizontal 90 2 Capas. Sémola Soja. Muestra 6.



Figura 106. Simulación 2D Horizontal 90 2 Capas. Sémola Soja. Muestra 10.

6.1.1.1.8 2D H 90 4 Capas Sémola Soja

Para este ensayo, se han colocada cuatro capas completamente segregadas. La primera capa es de partículas gruesas, sobre la que se coloca otra capa de partículas finas y otras dos capas de partículas gruesas y finas sucesivamente.

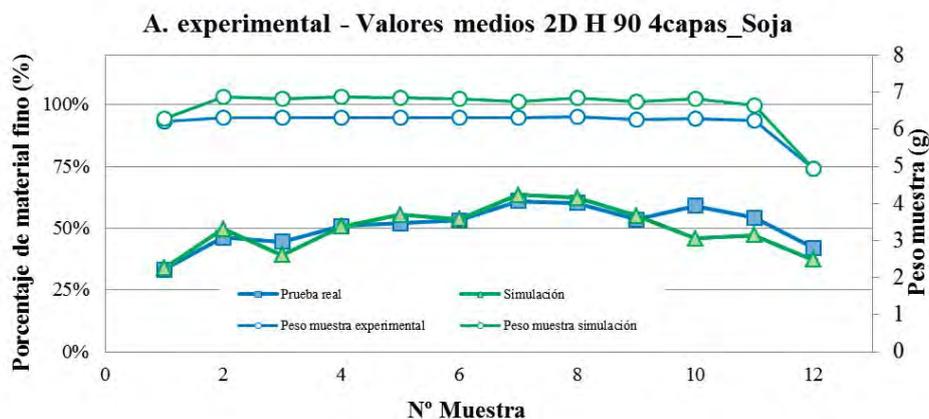


Figura 107. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 4 capas. Sémola-Sémola.

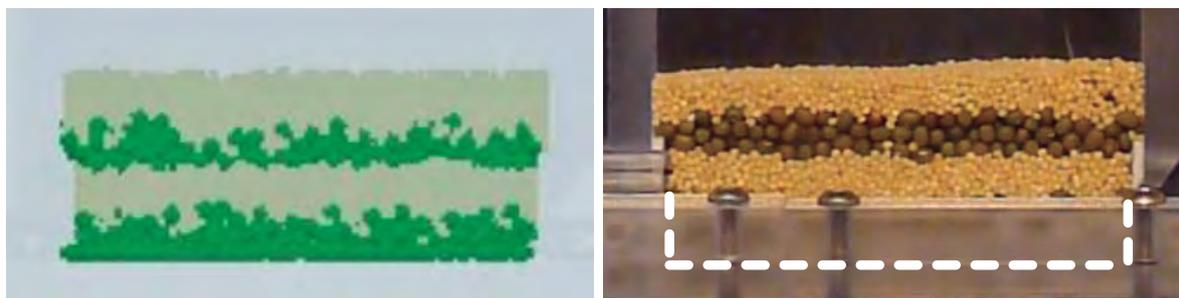


Figura 108. Simulación 2D Horizontal 90 4 Capas. Sémola Soja. Estado inicial.

En este caso la descarga comienza con una pequeña parte de partículas finas que se han segregado desde el llenado. Y pasa a crearse el mismo flujo que es difuminado por el flujo alternativo del carro y el hecho de que las capas son muy finas.

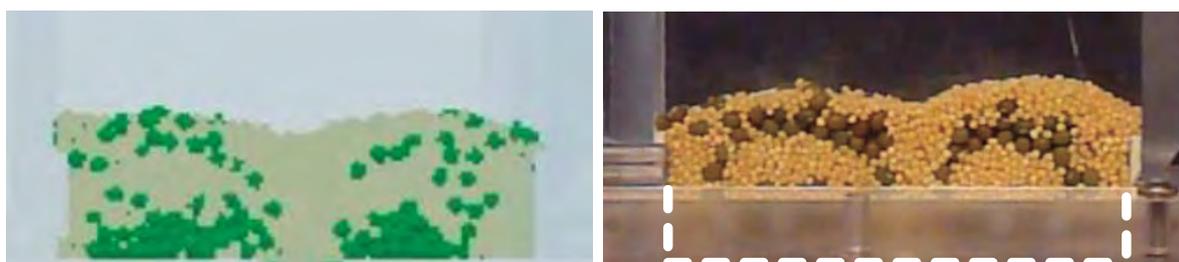


Figura 109. Simulación 2D Horizontal 90 4 Capas. Sémola Soja. Muestra 3.



Figura 110. Simulación 2D Horizontal 90 4 Capas. Sémola Soja. Muestra 7.

6.1.1.2 Conclusiones del llenado por capas

Tras analizar todas las pruebas y resumir los errores cuadráticos medios en la Tabla 4, se puede concluir que los parámetros de simulación que se han obtenido después del proceso iterativo de calibrado de parámetros son correctos ya que todos los valores son menores de un 12%.

ITERACIÓN ENTRE PARTÍCULAS	Coefficiente Restitución	Coefficiente de fricción estática	Coefficiente de rodadura
I1- I2	0.8	0.05	0.01
I1 – I1	0.9	0.1	0.1
I1 – pared	0.8	0.05	0.01
I2 – I2	0.9	0.3	0.1
I2 – pared	0.95	0.3	0.1
Pared – pared	0.9	0.15	0.01

Tabla 3. Valores de los parámetros relativos a las interacciones tras la calibración en el llenado por capas.

Simulación	RMSE (%)
2D V 90 2 capas Sémola-Sémola	6.87
2D V 90 4 capas Sémola-Sémola	8.76
2D H 90 2 capas Sémola-Sémola	11.14
2D H 90 4 capas Sémola-Sémola	7.03
2D V 90 2 capas Sémola-Soja	9.87
2D V 90 4 capas Sémola-Soja	9.13
2D H 90 2 capas Sémola-Soja	8.48
2D H 90 4 capas Sémola-Soja	5.09

Tabla 4. Valores de error cuadrático medio en las simulaciones por capas.

Además se puede confirmar que el comportamiento de las partículas es siempre muy similar, se comienza con un comprimido donde prácticamente solo hay partículas gruesas (capa inferior) para pasar a descargar un porcentaje alto de partículas finas y una reducción en el final de la prueba.

Cuando la prueba está formada por cuatro capas, este fenómeno se repite dos veces en una misma prueba. Es decir, en una prueba con dos capas de crea una curva, mientras que cuando la prueba se realiza con cuatro capas, el resultado es una gráfica con dos curvas.

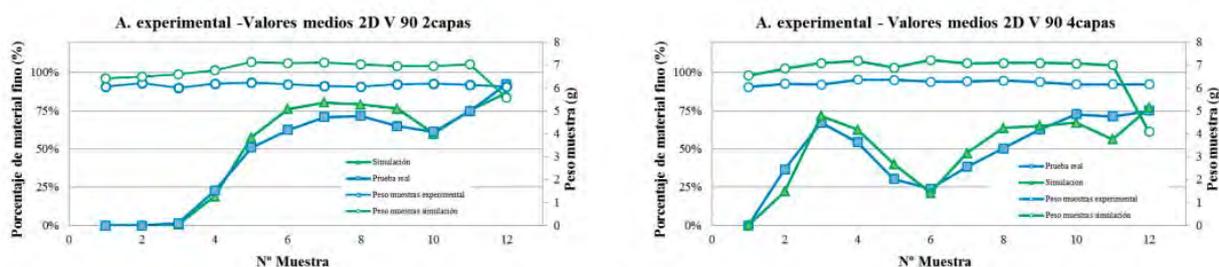


Figura 111. Comparativa de resultados entre el llenado por 2 o 4 capas.

En cuanto a peso de los comprimidos, hay que mencionar que las partículas “reales” no son esferas perfectas (presentan irregularidades), y por lo tanto el llenado de la matriz no es tan efectiva (no se llena tanto) como en el caso de las partículas de la simulación, que sí son esferas perfectas. Por esa razón el peso de las muestras reales siempre es inferior a las muestras de la simulación.

6.1.1.3 *Ib. Llenado Industrial.*

A continuación se analizan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la segunda fase, donde se sigue experimentando con las geometrías básicas Vertical y Horizontal del carro alimentador, pero realizando ya la aproximación al procedimiento de llenado industrial.

6.1.1.3.1 2D V 90 25/75 Sémola Sémola

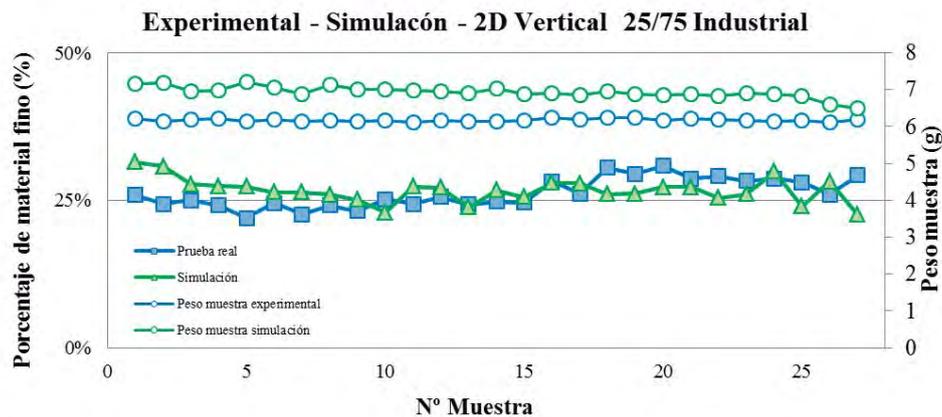


Figura 112. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 25/75. Sémola-Sémola.

Como se puede observar en la Figura 112, desde la situación inicial se mantiene el carro con una mezcla bastante homogénea, lo que origina una curva de porcentaje de material fino muy constante y de valor próximo al valor objetivo (25%). Esto puede deberse a la mayoría de partículas gruesas y al tipo de carro vertical donde el movimiento de partículas debido al movimiento alternativo del carro es limitado.

En la figura también se puede observar que la simulación se ajusta con bastante similitud a la prueba experimental, ya que el error cuadrático medio es un 3.54%.

6.1.1.3.2 2D V 90 50/50 Sémola Sémola

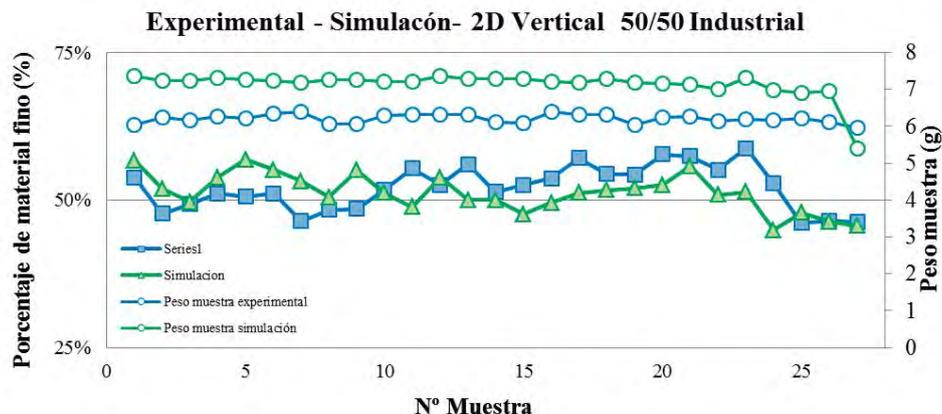


Figura 113. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 50/50. Sémola-Sémola.

En la Figura 113, se puede observar la tendencia de la prueba experimental y la similitud de la simulación. En la prueba experimental se puede ver que la mezcla no se mantiene tan cerca del valor teórico (50%) como en el caso anterior, ya que en la primera parte de la recarga el valor desciende del 50% puntualmente lo que hace que en la última parte ese valor suba de porcentaje.

La simulación tampoco se ajusta tan bien a la prueba experimental, aunque se puede observar que la tendencia se sigue perfectamente.

6.1.1.3.3 2D V 90 75/25 Sémola Sémola

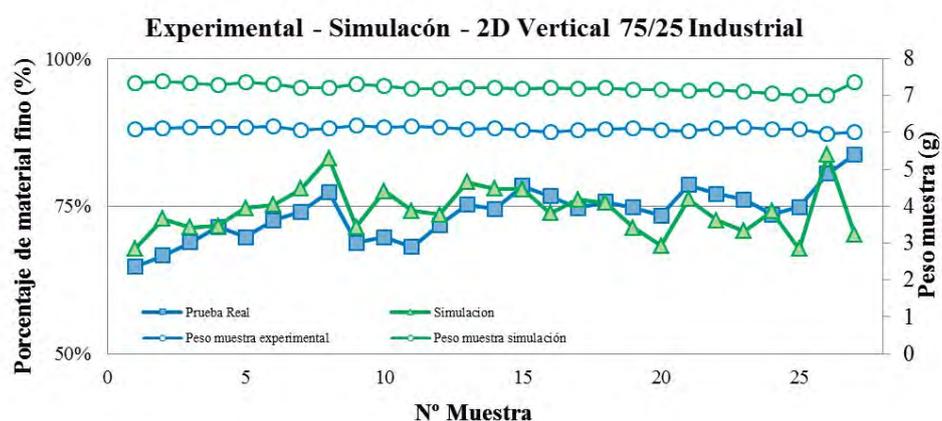


Figura 114. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 75/25. Sémola-Sémola.

En este caso, el porcentaje no se mantiene tan bastante estable y cercano al 75% en la primera parte como en otros casos. Esto se debe a la segregación que se produce durante el llenado y la segregación por percolación de las partículas pequeñas durante los primeros comprimidos.

6.1.1.3.4 2D H 90 25/75 Sémola Sémola

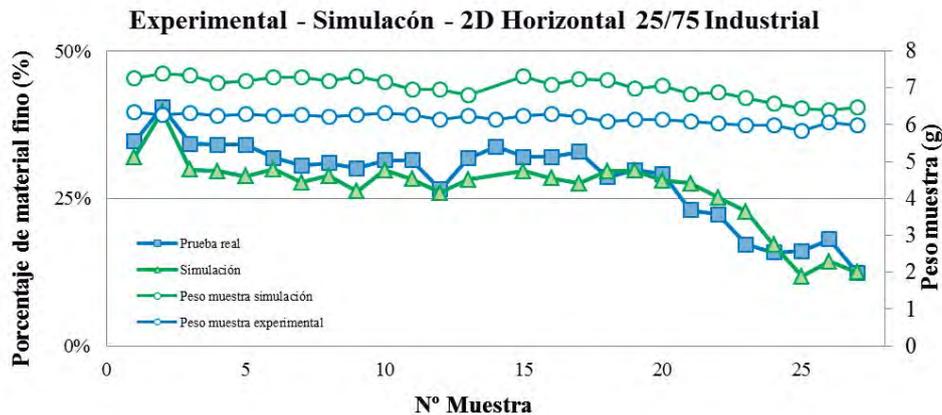


Figura 115. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 25/75. Sémola-Sémola.

En la Figura 115 se puede observar que en este caso sí que se produce una mayor segregación con respecto al valor teórico de la mezcla (25%). Esto es debido al tipo de carro usado, ya que en este caso el carro permite una mayor segregación debida al movimiento alternativo del carro.

En cuanto a la simulación se puede comentar que el ajuste es bastante bueno ya que aunque el error cuadrático medio es de 4.13 %, la tendencia de la curva es bastante precisa.

6.1.1.3.5 2D H 90 50/50 Sémola Sémola

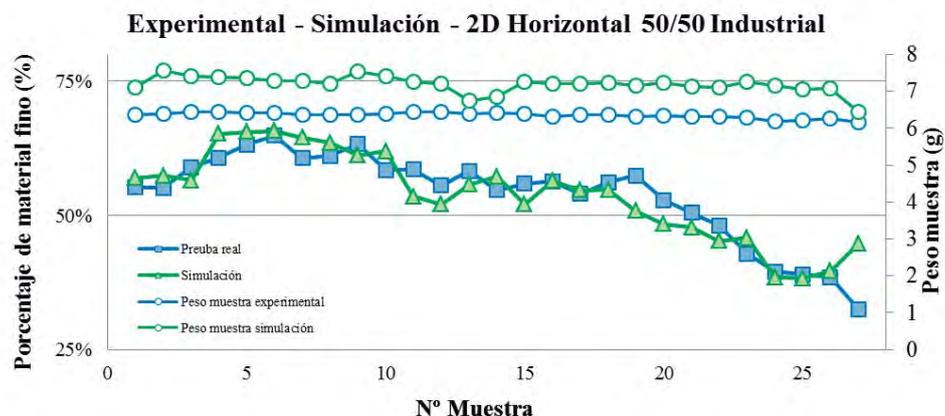


Figura 116. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 50/50. Sémola-Sémola.

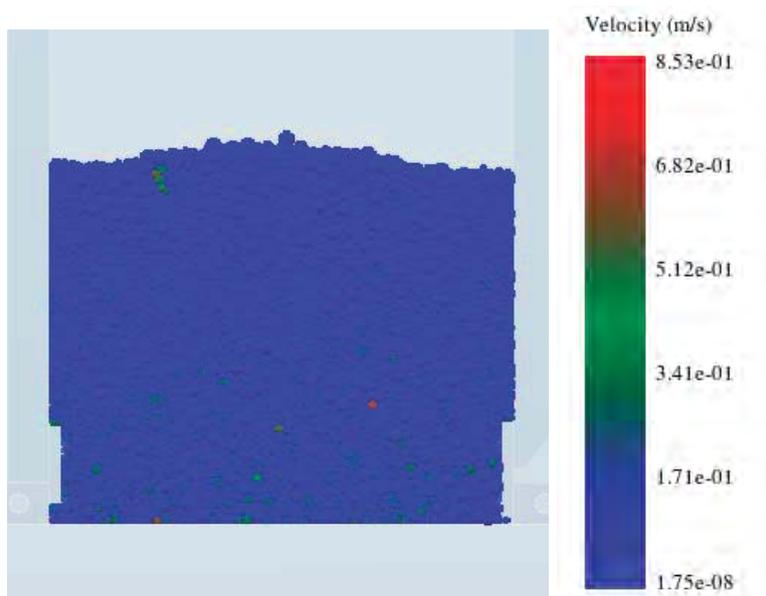


Figura 117. Distribuciones de velocidad de las partículas gruesas y finas durante la estabilización de las partículas en el llenado. Imagen EDEM.

Como en el caso anterior, con esta configuración de carro la segregación es bastante mayor con respecto al valor teórico de la mezcla (50%). En la Figura 116 se puede observar un porcentaje superior al 50% durante la primera fase de la descarga del depósito que es compensado por una falta de material fino en la última fase.

Esta tendencia es debida a la percolación de las partículas pequeñas durante la fase de estabilización del llenado Figura 117 y primeros comprimidos.

6.1.1.3.6 2D H 90 75/25 Sémola Sémola

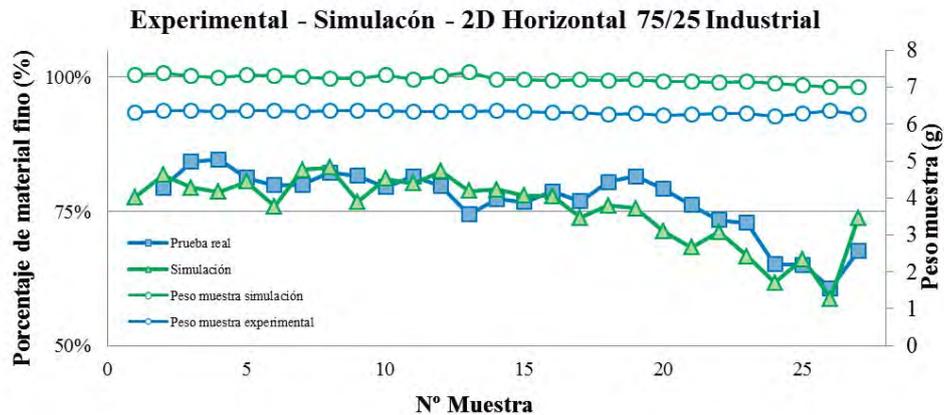


Figura 118. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 75/25. Sémola-Sémola.

En esta prueba donde la mayoría de las partículas con finas (75%) no se produce tanta segregación como en los casos anteriores lo que tiene sentido ya que el fenómeno de percolación tiene mucha menos influencia en este caso.

Como en los casos anteriores las simulaciones se ajusta bastante bien a la prueba real, con un error cuadrático medio inferior al 5%.

6.1.1.3.7 2D V 90 25/75 Sémola Soja

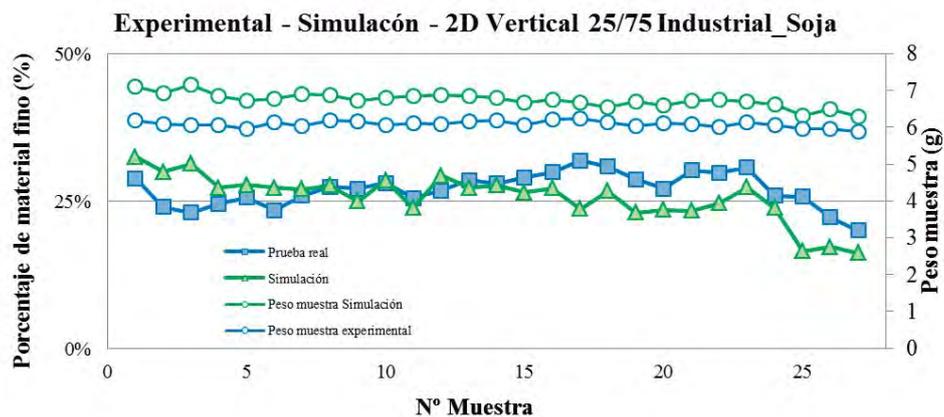


Figura 119. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 25/75. Sémola-Soja.

Como en el caso del ensayo con sémola, la segregación que se produce en el carro vertical y un 25% de partículas finas no es muy acusada y se mantiene cercano al 25%.

En este caso de la soja, sí que se podría mencionar que la concentración de partículas finas aumenta en torno al comprimido 17 de forma más acusada que con la sémola. Esto es debido al efecto de las nueces de Brasil.



Figura 120. Efecto nueces de Brasil en el comprimido 17 de la prueba real 2D Vertical 25/75. Sémola-Soja.

6.1.1.3.8 2D V 90 50/50 Sémola Soja

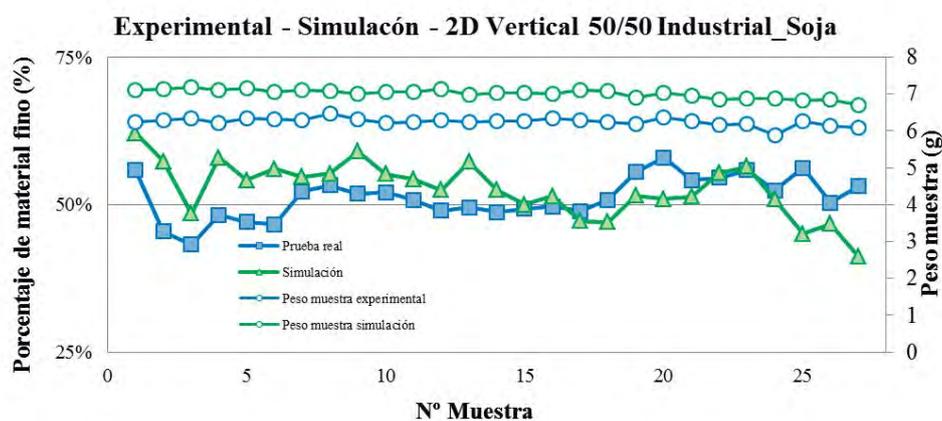


Figura 121. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 50/50. Sémola-Soja.

En este caso la prueba experimental tarda en estabilizarse un poco, pero a partir del 4 comprimido se puede observar que la prueba se mantiene estable hasta el comprimido 17 donde pasa a incrementarse la concentración de partículas finas.

La simulación en este caso no se mantiene tan cercana a la prueba real y eso se refleja en el error cuadrático medio, que en este caso aumenta al 6.16 %.

6.1.1.3.9 2D V 90 75/25 Sémola Soja

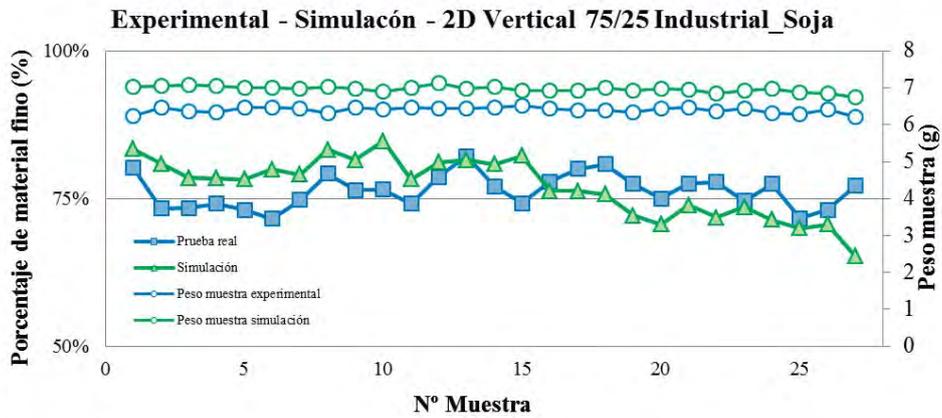


Figura 122. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 75/25. Sémola-Soja.

En esta Figura 125 la curva experimental de segregación no es muy ajustada al porcentaje teórico 75%, varía con un error entorno al 75%.

En cuanto a la simulación, esta no es tan buena como en otras pruebas ya que el error es 5.74%.

6.1.1.3.10 2D H 90 25/75 Sémola Soja

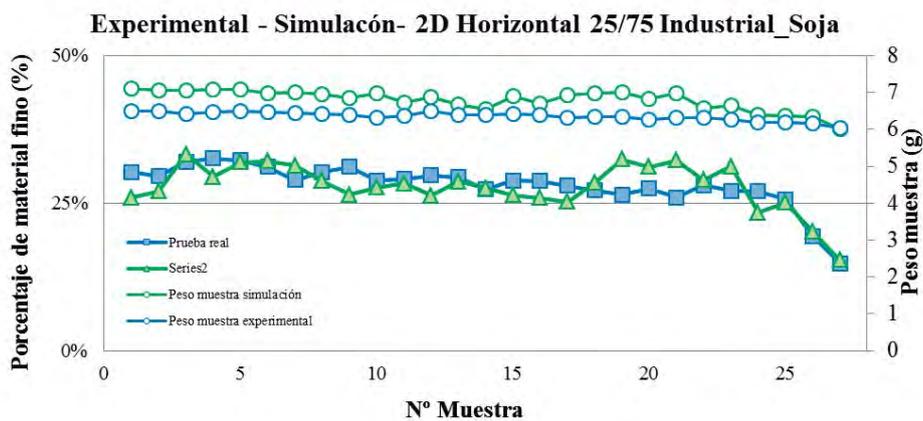


Figura 123. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 25/75. Sémola-Soja.

Como en otros caso, la mezcla se mantiene bastante homogénea frente al valor teórico del 25%, misma tendencia que sigue la simulación que se ajusta a la prueba real con un error cuadrático medio del 4.13%.

6.1.1.3.11 2D H 90 50/50 Sémola Soja

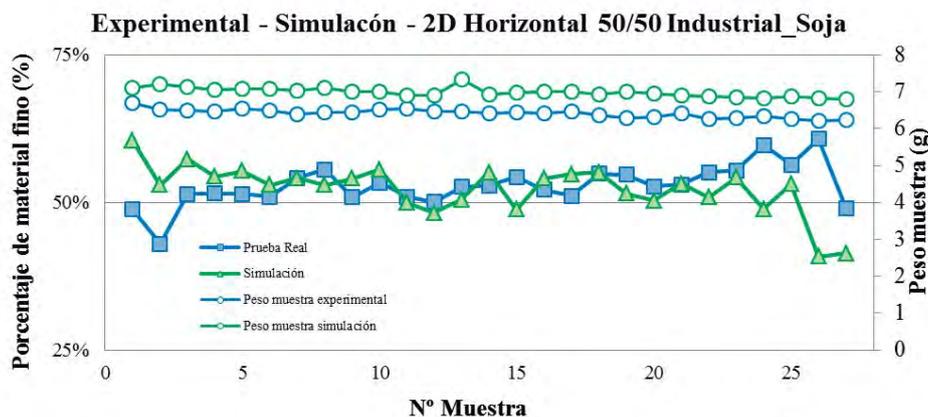


Figura 124. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 50/50. Sémola-Soja.

En la Figura 124, se puede observar la media de las pruebas experimentales frente a la simulación obtenida mediante la calibración de los parámetros en la fase anterior.

En ella se puede observar que tanto la prueba real, como la simulación varían entorno al valor teórico de la mezcla (50%) sin sufrir grandes desviaciones.

6.1.1.3.12 2D H 90 75/25 Sémola Soja

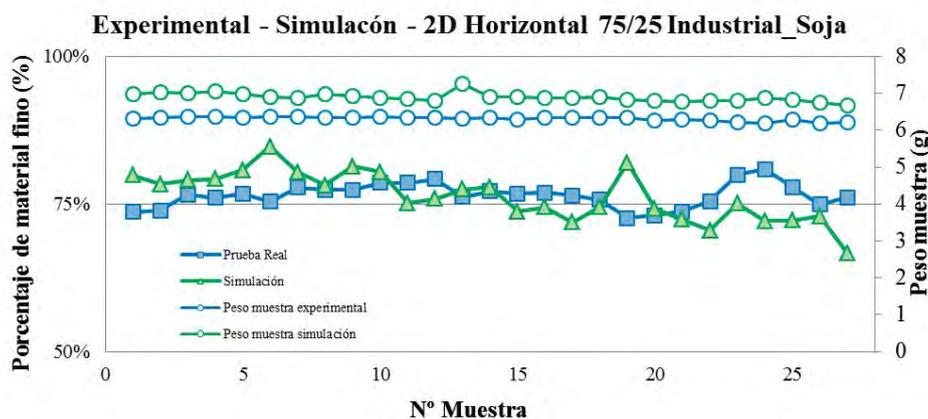


Figura 125. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 75/25. Sémola-Soja.

Como en el caso anterior, en la Figura 125 se puede observar que tanto la prueba real, como la simulación varían entorno al valor teórico de la mezcla (75%) sin sufrir grandes desviaciones salvo en el caso de la simulación donde si se producen un par de picos que no encontramos en la media de las pruebas reales.

Si se analizan las tres pruebas reales de donde se obtiene la media contra la que se compara la simulación (Figura 56) estos picos también están presentes en las pruebas reales, pero han sido suavizados al realizar la media de los tres ensayos.

6.1.1.4 Conclusiones del llenado industrial

Como conclusión de esta fase se podría afirmar que los valores obtenidos mediante el proceso iterativo de calibración para los parámetros de la simulación son suficientemente buenos como para simular este proceso de descarga de un carro alimentador alternativo.

En la siguiente tabla se puede observar los errores que existen entre las pruebas experimentales y las simulaciones para los diferentes ensayos.

Simulación	RMSE (%)		
	25/75	50/50	75/25
2D Horizontal Sémola-Sémola	3.54	3.67	4.04
2D Vertical Sémola-Sémola	3.52	4.39	4.79
2D Horizontal Sémola-Soja	4.13	4.64	4.43
2D Vertical Sémola-Soja	3.99	6.16	5.74

Tabla 5. Valores de error cuadrático medio en las simulaciones con carro vertical y horizontal. Llenado industrial

Basándonos en los valores de la tabla anterior y en la Figura 126, se puede ver de una forma bastante clara que las mezclas que mejor se pueden predecir son las que están basadas en un 25% de finas, ya que todos los ensayos minimizan el error contra la prueba experimental en esa configuración.

Por otro lado, también se puede observar que las simulaciones con carros horizontales son mejores en cuanto a la fiabilidad de las simulaciones.

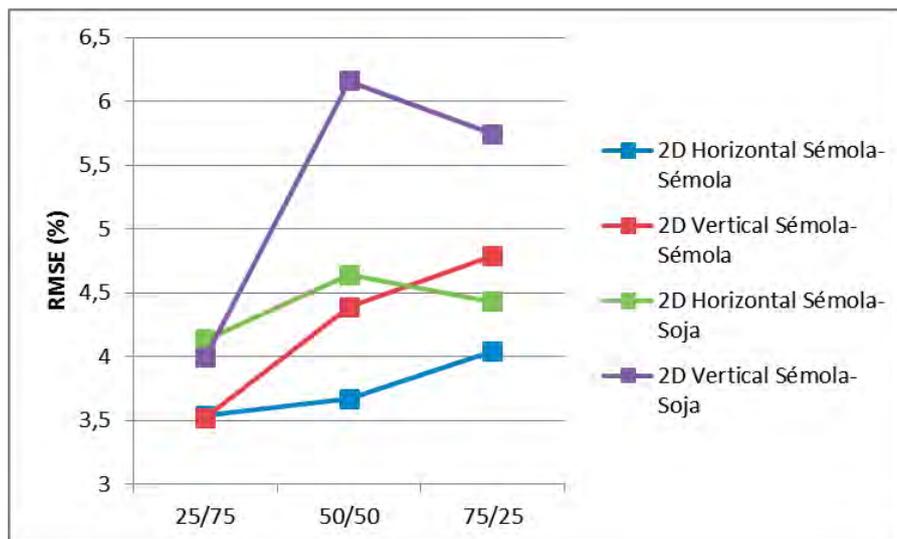


Figura 126. Comparativa de errores cuadraticos medios contra las diferentes pruebas experimentales.

Como en las conclusiones del llenado por capas, el peso de los comprimidos de las simulaciones siempre es mayor que el de las pruebas experimentales debido a la geometría de las partículas.

6.1.1.5 *Ic. Llenado industrial continuo.*

Es este apartado se analizan y comparan resultados obtenidos durante la descarga de forma continua de un carro 2D.

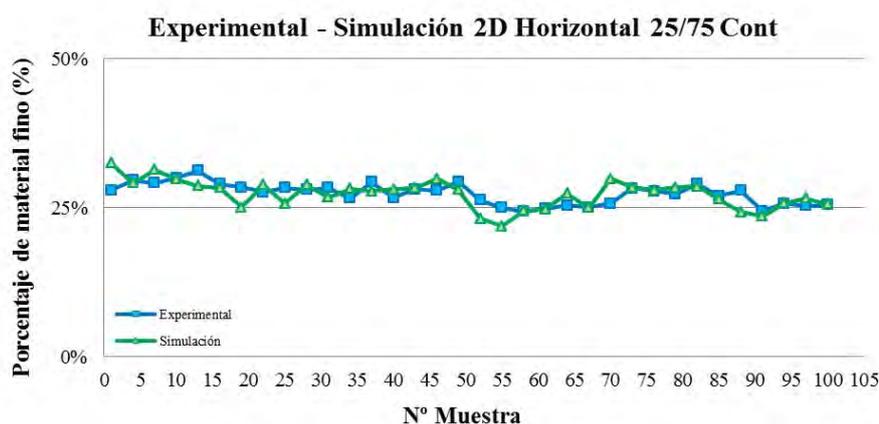


Figura 127. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 25/75. Llenado continuo. Sémola-Sémola.



Figura 128. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 50/50. Llenado continuo. Sémola-Sémola.



Figura 129. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Horizontal 75/25. Llenado continuo. Sémola-Sémola.

En las Figura 127, Figura 128 y Figura 129, se puede observar como la tendencia de las pruebas experimentales y simulaciones es igual que en el llenado industrial de la Figura 115, Figura 116 y Figura 117, repitiendo la misma tendencia cada cierto número de comprimidos.

Como en otros casos anteriores la prueba que contiene solo un 25% de partículas finas, se asemeja mejor a la prueba real, siendo el RMSE de un 3.32% frente al 6.29% de la prueba basada en un 50% de partículas finas.

Simulación	RMSE (%)		
	25/75	50/50	75/25
2D Horizontal Sémola-Sémola Llenado continuo	3.32	6.29	6.12

Tabla 6. Valores de error cuadrático medio en las simulaciones horizontal y llenado continuo.

6.1.1.6 Id. Llenado industrial carro 3D.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos con un carro en su configuración 3D con el mismo carro con la configuración 2D.

6.1.1.6.1 3D V 25/75

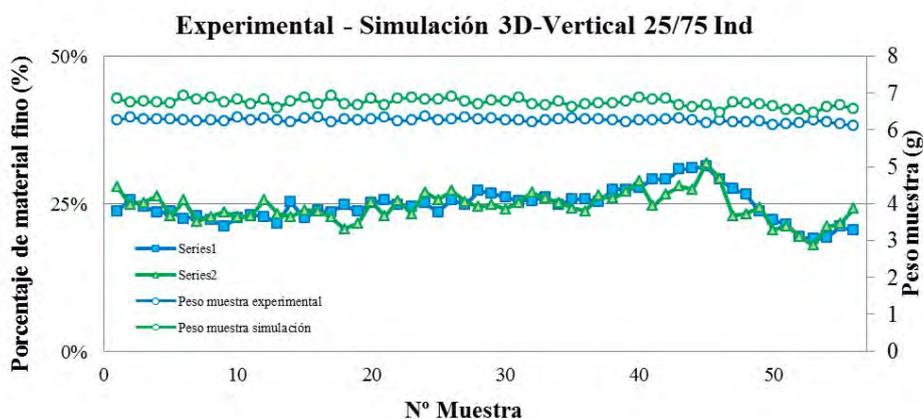


Figura 130. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. 2D Vertical 25/75. Sémola-Sémola.

Como se puede observar en la Figura 130, la simulación se asemeja a la prueba experimental con un error cuadrático medio de 4.20 %.

Por otro lado, en la Figura 131 se puede comparar los resultados del carro 2D con el carro 3D. En ella se puede observar como tanto las pruebas experimentales como las simulaciones encajan perfectamente.

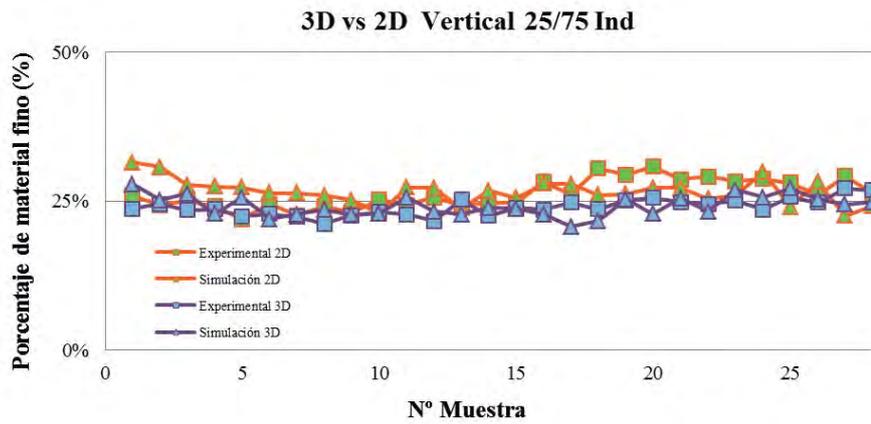


Figura 131. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales en los carros 2D y 3D. Configuración Vertical 25/75. Sémola-Sémola

6.1.1.6.2 3D H 25/75

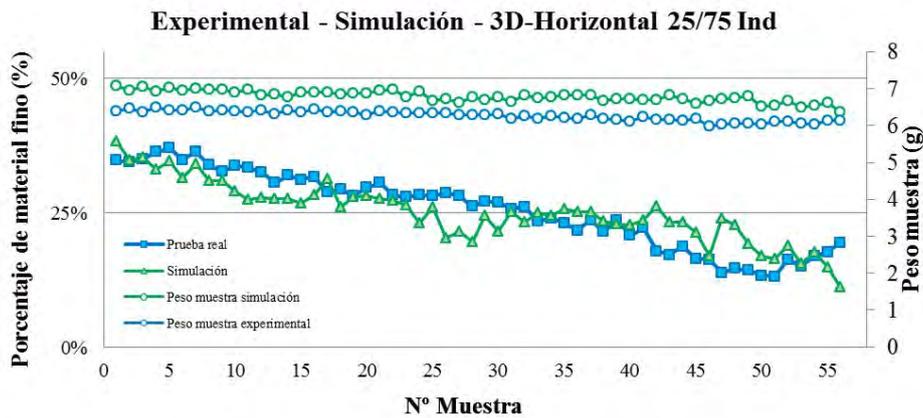


Figura 132. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. 3D Horizontal 25/75. Sémola-Sémola.

Como en el caso del carro vertical, para el carro horizontal la simulacion se asemeja a la prueba experimental con un error cuadratico medio de 4.20%.

En la Figura 133, se puede ver que las simulaciones y pruebas experimentales se asemejan.

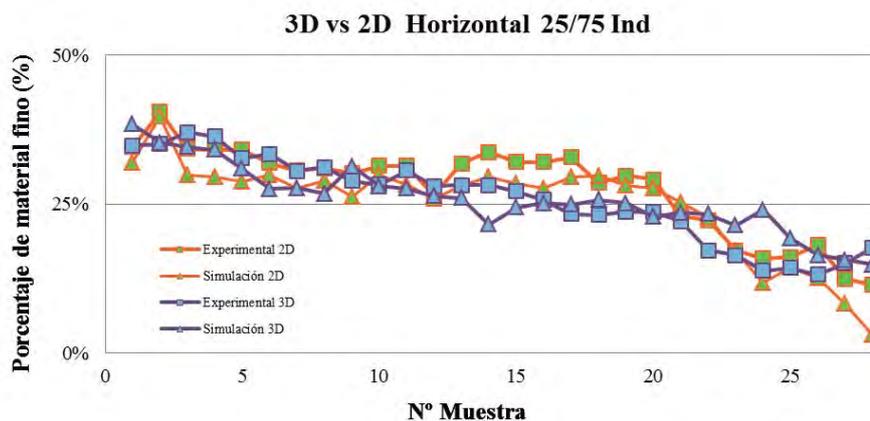


Figura 133. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales en los carros 2D y 3D. Configuracion Horizontal 25/75. Sémola-Sémola

Simulación	RMSE (%)
3D Horizontal Sémola-Sémola	4.20
3D Vertical Sémola-Sémola	3.80

Tabla 7. Valores de error cuadrático medio en las simulaciones con carro vertical y horizontal en su configuración 3D.

Como resumen, ha quedado demostrado que un modelo 2D es capaz de representar perfectamente en carro 3D pero disminuyendo el tiempo computacional.

6.1.2 FASE II Carro en forma de zapato.

En esta fase, se realizan los ensayos usando un carro alimentados en forma de “zapato” que es lo que realmente se usa en este tipo de máquinas alternativas debido a su configuración carro / punzón compresor.

6.1.2.1 2H-143

Usando un carro en forma de “zapato” con su configuración 2H-143, se han realizado diferentes ensayos experimentales y computacionales como se muestra a continuación. Esta configuración de carro “elimina” la punta del zapato y convierte el carro alimentador prácticamente en un carro vertical inclinado.

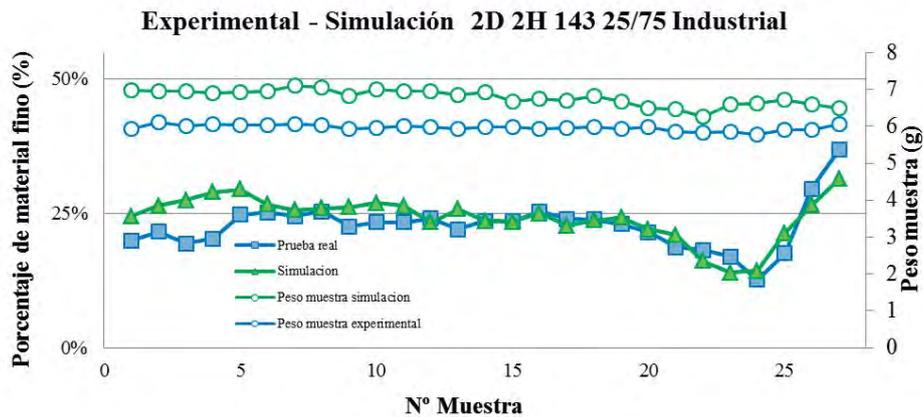


Figura 134. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2H-143 25/75. Sémola-Sémola.



Figura 135. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Muestra 24.

En la Figura 134 se puede ver cómo tanto la prueba experimental como la simulación se mantienen estables y entorno al valor teórico del 25% casi toda la prueba hasta el comprimido 20 donde comienza a bajar para provocar el pico en el comprimido 24. Este pico se debe a la segregación por percolación y a la acumulación de partículas gruesas en la punta que se mueven como una bolsa de estas partículas (Figura 135) donde llegado ese comprimido son atrapadas por la matriz.

Exactamente el mismo fenómeno persiste aunque se varíe el porcentaje de material fino o grueso. La única diferencia es que en mezclas con porcentajes más grandes de partículas pequeñas, este pico ocurre antes, en torno al comprimido 20-21.

En el caso de 50% de material fino (Figura 136) se puede observar como el pico se genera en el comprimido 20), por otro lado en la Figura 137 se puede observar como la segregación por percolación se va generando desde muestras más tempranas.

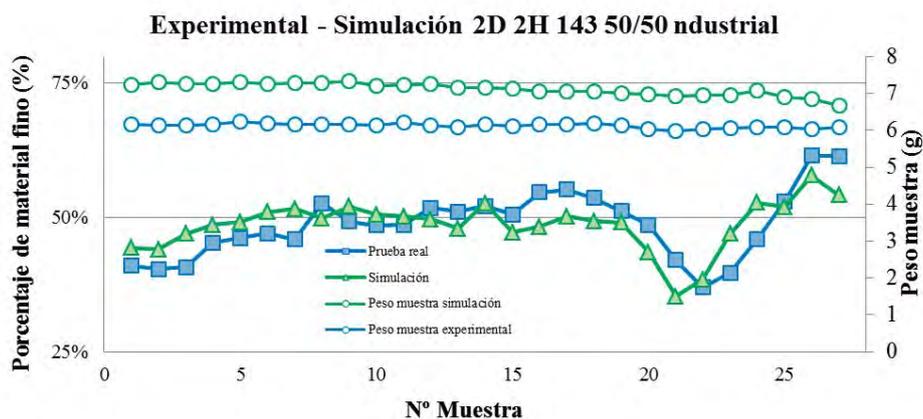


Figura 136. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2H-143 50/50. Sémola-Sémola.



Figura 137. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Muestra 13.

Cuando el porcentaje de partículas finas es un 75%, la simulación comienza con una caída de material fino en los primeros comprimidos, donde a partir del quinto comprimido se estabiliza hasta el 20 comprimido donde vuelve a generarse el pico de falta de material fino generado por la acumulación de partículas gruesas.

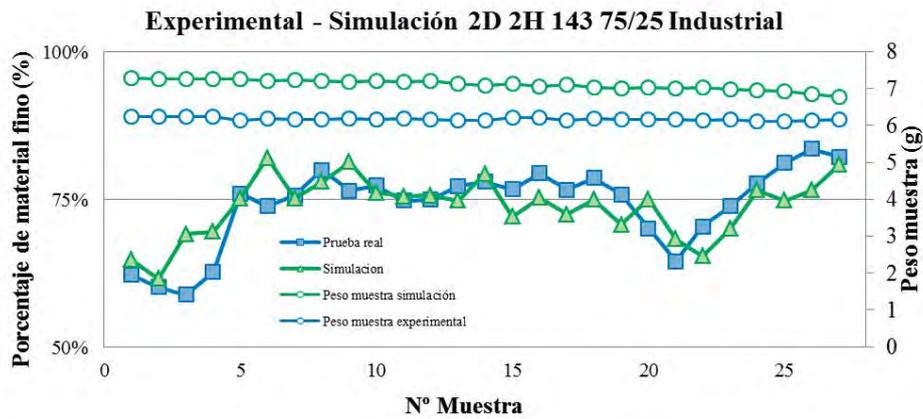


Figura 138. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2H-143 75/25. Sémola-Sémola.

6.1.2.2 1V-130

Como en el caso anterior, las pruebas también se han realizado con el carro en forma de “zapato” en su configuración 1V-130.

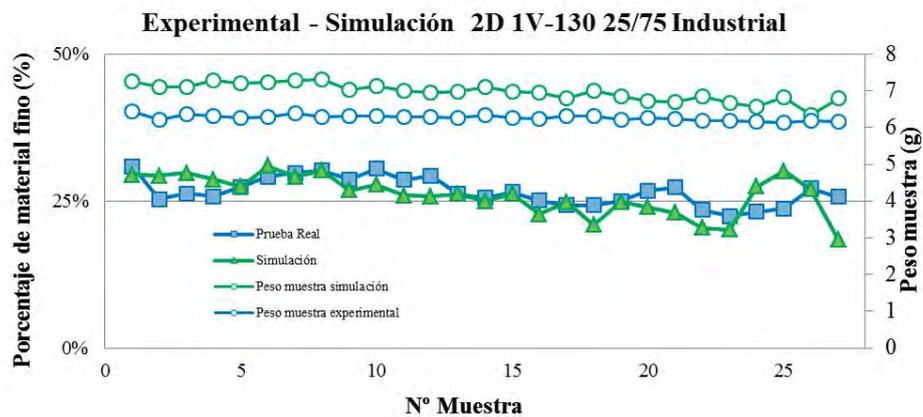


Figura 139. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 1V-130 25/75. Sémola-Sémola.

En este caso, la descarga del carro es mucho más estable y el pico que se podía observar en la configuración anterior ha desaparecido.

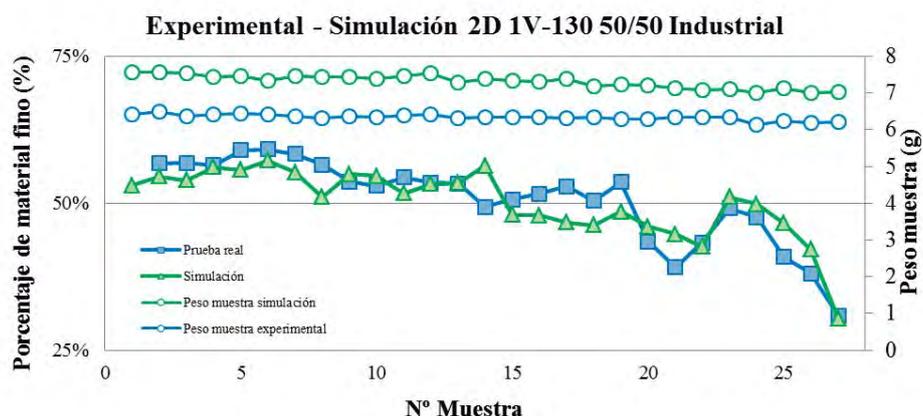


Figura 140. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 1V-130 50/50. Sémola-Sémola.

Para el caso de un 50% de material fino, sí que se puede observar en la Figura 140 que la segregación es más acusada que para un 25% de material fino, pero como en el caso anterior no existe el pico de ausencia de material fino, tendencia que sigue la simulación.

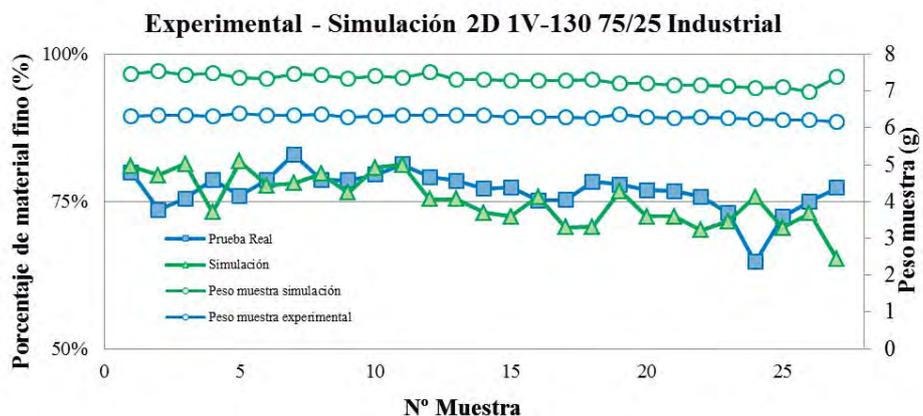


Figura 141. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 1V-130 75/25. Sémola-Sémola.

Cuando la mezcla está formada por un 75% de material fino (Figura 141), tanto la prueba experimental, como la simulación fluctúan cerca del valor teórico del 75% pero con bastante fluctuación, haciendo ambas pruebas poco estables.

6.1.2.3 2V-120

Todas las pruebas también se han realizado con el carro en configuración 2V-120. Este caso es el que más puede parecerse a la forma del zapato original en la máquina de JBonals. (Figura 2)

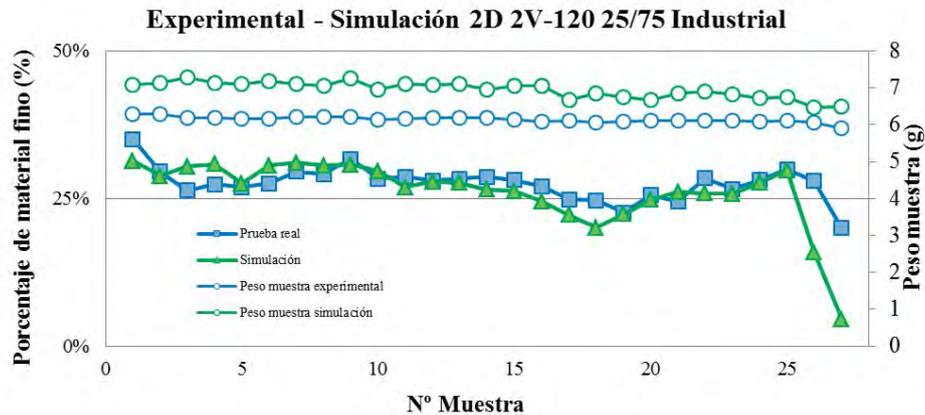


Figura 142. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2V-120 25/75. Sémola-Sémola.

En la Figura 146 se puede observar que al comienzo de la descarga y hasta el comprimido 15, se están generando comprimidos con una mayor concentración de partículas finas. Pasado ese comprimido comienzan a generarse comprimidos con menos concentración de partículas finas.

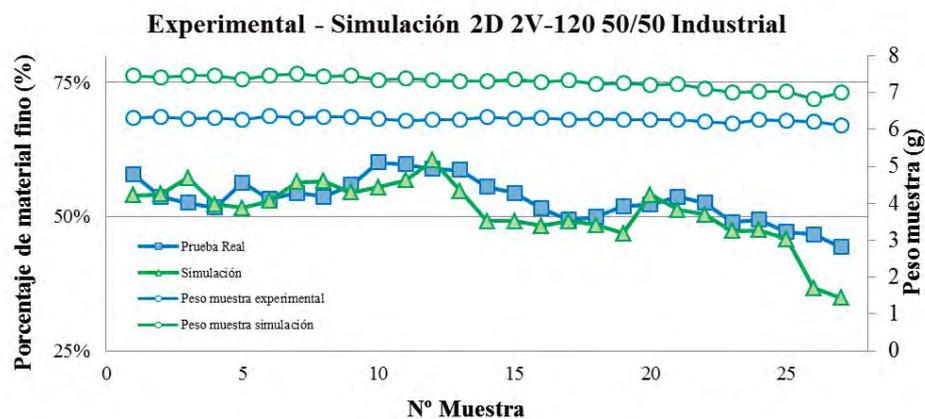


Figura 143. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2V-120 50/50. Sémola-Sémola.

Como en el caso anterior, al comienzo del ensayo hay un incremento de partículas finas en cada comprimido. Pasado el comprimido 17 la concentración de partículas

finas en cada comprimido decrece. Este fenómeno está causado por el fenómeno de las nueces de Brasil.

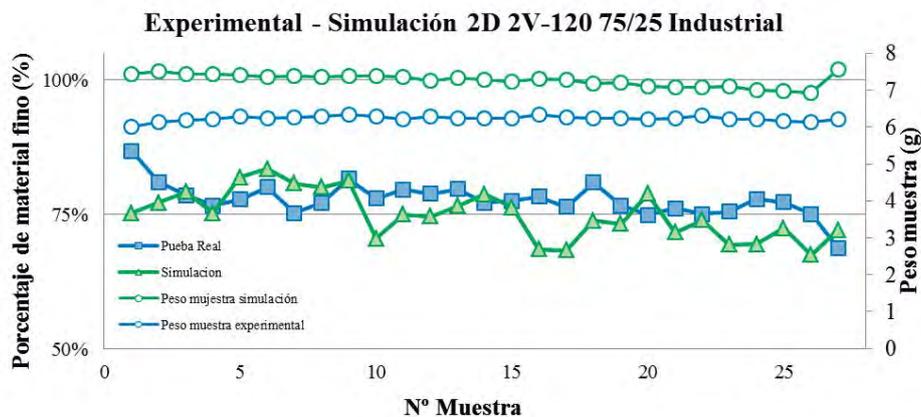


Figura 144. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2V-120 75/25. Sémola-Sémola.

Para el caso de un 75% de material fino la prueba experimental se mantiene bastante estable, mientras que la simulación es más inestable.

6.1.2.4 4V-120

Como en el resto de los casos, todas las pruebas 25/75 50/50 75/25 también han sido realizadas con el carro en configuración 4V-120.

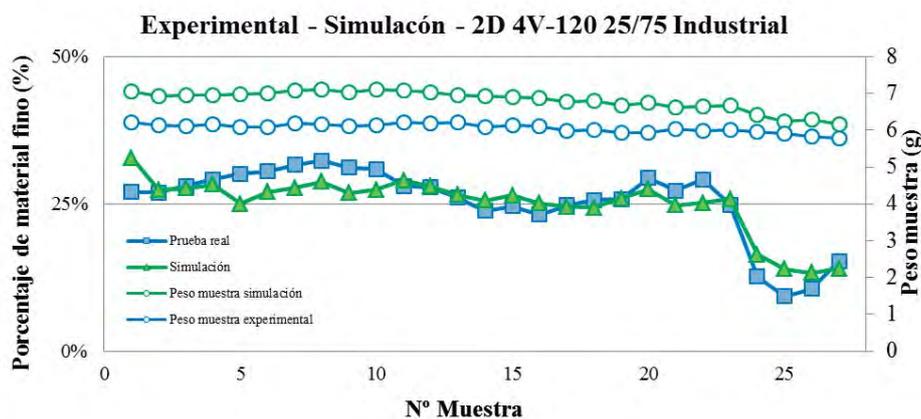


Figura 145. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 4V-120 25/75. Sémola-Sémola.

Para el caso de un 25% de material fino, se puede observar como al comienzo de la prueba experimental y simulación, los comprimidos se generan con un porcentaje de

material fino superior al 25%, a partir del comprimido 13 este porcentaje decrece. Este momento encaja cuando el nivel de la mezcla desciende de la columna del zapato y el porcentaje vuelve a subir durante unos comprimidos a quedar el material libre de movimiento en la base del zapato.

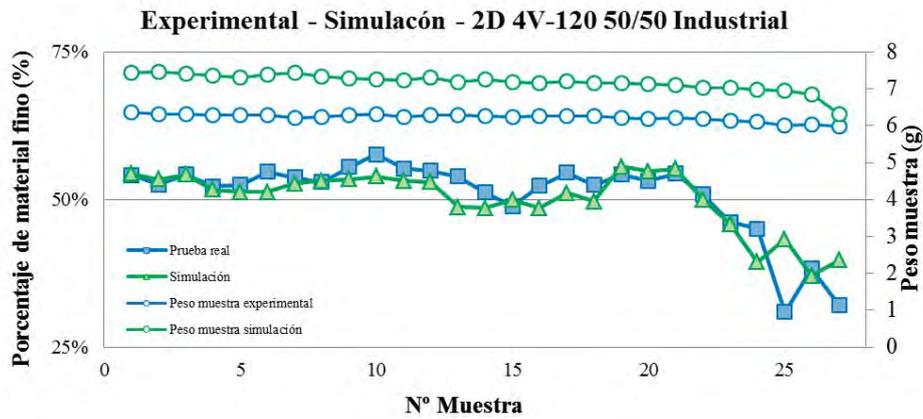


Figura 146. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 4V-120 50/50. Sémola-Sémola.

El efecto de la percolación y el fenómeno de las nueces de Brasil durante la descarga de la columna y el segundo efecto al quedar liberado la mezcla con la descarga, también se repite cuando el porcentaje de la mezcla es un 50% de material fino.

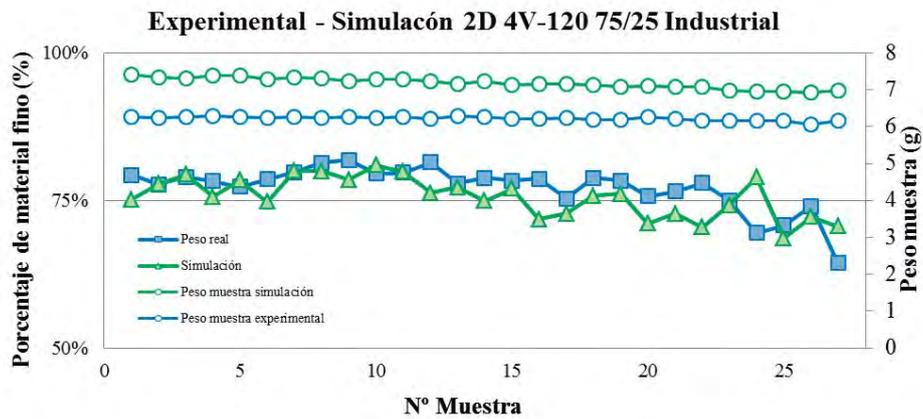


Figura 147. Comparativa de resultados entre la simulacion en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 4V-120 75/25. Sémola-Sémola..

6.1.2.5 3D 2V-120 25/75 Industrial

El siguiente ensayo fue realizado con el carro 2V-120 en su configuración 3D, para poder comparar que el carro 2D es una simplificación acertada del mismo.

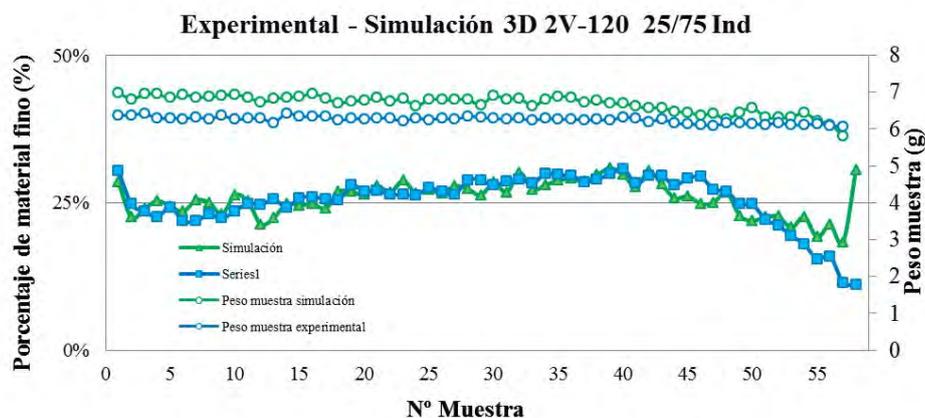


Figura 148. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales en el carro 3D. Configuración 2V-120 25/75. Sémola-Sémola.

Como se puede observar en la Figura 148, la descarga de un carro 3D con la configuración 2V-120, mantiene la misma tendencia que en el caso 2D, pero de una forma más suave.

Este hecho también se puede observar en la Figura 149 donde se puede comparar los resultados del carro 2D con el carro 3D.

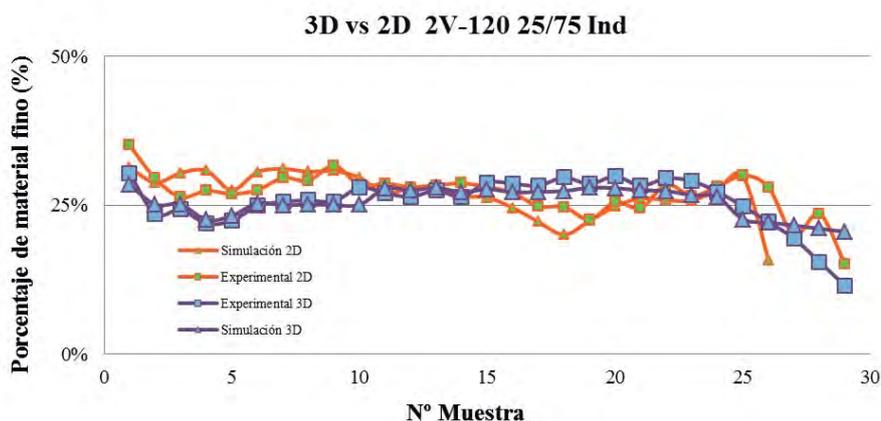


Figura 149. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales en los carros 2D y 3D. Configuración 2V-120 25/75. Sémola-Sémola.

6.1.2.6 2D 2V-120 25/75 Continuo

En el caso de la prueba con un llenado continuo se puede observar que sigue un ciclo sinusoidal, que encaja con cada recarga a los quince comprimidos.

En ciertas parte de la gráfica este efecto se ha difuminado un poco por el decalaje de las gráficas resultantes de las pruebas experimentales.

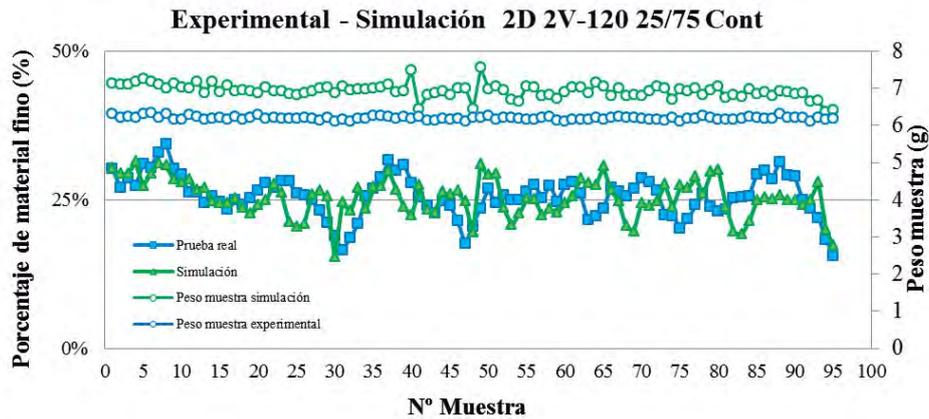


Figura 150. Comparativa de resultados entre la simulación en EDEM y las pruebas experimentales. Configuración 2V-120 25/75. Llenado continuo. Sémola-Sémola.

La simulación encaja con bastante fiabilidad (RMSE= 4.25%) lo que hace afirmar que los parámetros de la simulación obtenidos durante el proceso de calibrado son óptimos.

6.1.3 Conclusiones del vaciado de la configuración “zapato”

Después de analizar una a una las pruebas con diferentes configuraciones de zapato se pueden concluir diferentes puntos:

1. Confirmación de los parámetros de la simulación

En la Tabla 8, se puede observar como los errores son inferiores al 12% que fue el objetivo inicial. Esto quiere decir que los parámetros de la simulación obtenidos del proceso de calibración son óptimos, y serian adecuados para realizar simulaciones en busca de optimizar el proceso sin la necesidad de realizar costosas pruebas.

Simulación	RMSE (%)		
	25/75	50/50	75/25
2H-143	6.57	6.53	7.32
1V-130	3.88	7.26	5.38
2V-120	5.66	5.59	5.61
4V-120	6.71	7.37	6.20

Tabla 8. Valores de error cuadrático medio en las simulaciones con carro en configuración zapato contra la prueba experimental.

En la siguiente figura podemos ver como la simulación de la configuración 2V-120 posee menor error que el resto de forma general, pero los parametros serian optimos para todas las simulaciones, error que tuvimos en las primeras fases de este estudio.

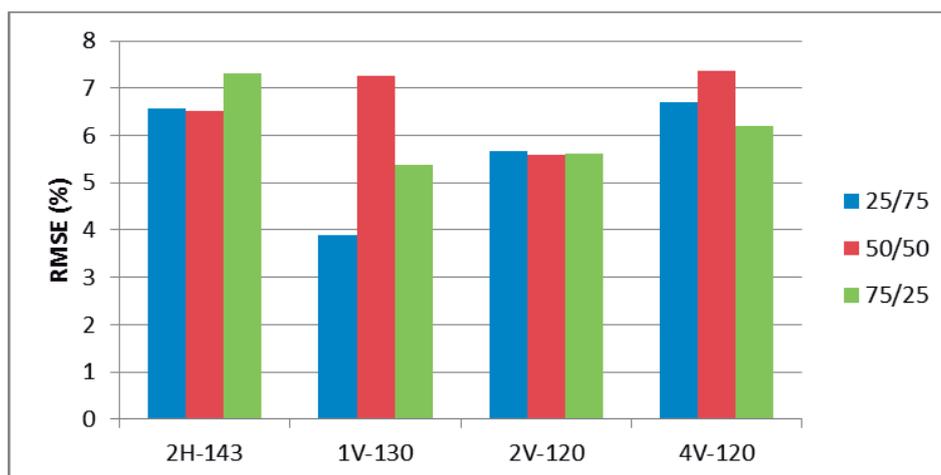


Figura 151. Errores cuadraticos medios en las diferentes configuraciones “zapatos”.

2. Grado de segregación

En cuanto al grado de segregación en función de la configuración del carro o del porcentaje de la mezcla, en la Tabla 9 se puede ver un resumen de los valores de error cuadrático medio.

Simulación	RMSE (%)		
	25/75	50/50	75/25
2H-143	4.44	4.74	5.05
1V-130	3.48	5.78	4.21
2V-120	5.68	4.41	4.44
4V-120	4.76	5.46	3.35

Tabla 9. Valores de error cuadrático medio en las simulaciones con carro en configuración zapato comparado con la mezcla teórica.

En la Figura 152 se puede observar como vuelve a quedar demostrado que no existe una configuración de zapato óptima para un porcentaje de mezcla, si no que en función del porcentaje de mezcla hay una configuración más óptima que el resto para minimizar la segregación.

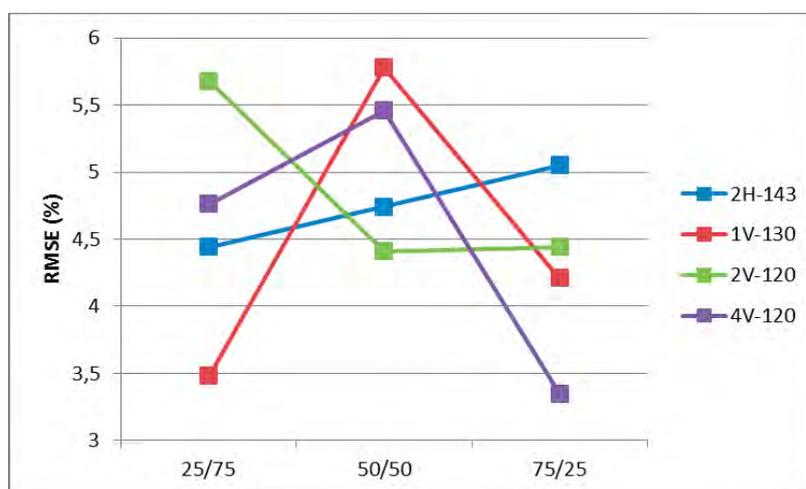


Figura 152. Errores cuadráticos medios en las diferentes configuraciones “zapatos”.

Analizando la figura anterior, se puede extraer que para un porcentaje de mezcla de un 25% de partículas finas, la configuración más óptima para minimizar la segregación es la 2V-120, sin embargo para una mezcla de 50% de partículas finas la mejor configuración es la 1V-130. Por otro lado, para una mezcla formada por 75% de partículas finas, la mejor configuración es la 2H-143.

Para finalizar, si juntamos la afirmación de que los parámetros que se han usado para realizar las simulaciones son correctos y que no existe una configuración óptima si no que depende de la mezcla que se va a usar para realizar los comprimidos, se puede afirmar que se ha encontrado un modelo con el cual se puede predecir cuál sería la geometría más óptima del carro en función de la mezcla antes de comenzar el trabajo de compresión. Lo que nos ayudaría a evitar costosas pruebas y partidas de material incorrectas.

3. Peso total de las muestras

Como se ha podido observar en las figuras donde se comparaban las medias de las pruebas experimentales con los resultados de las simulaciones, el peso de las muestras de las pruebas reales siempre es inferior al peso de las muestras experimentales. Esto es debido a la geometría de las partículas, como se puede observar en la Figura 165 no son “perfectamente” esféricas, pero si las partículas de la simulación. Como las partículas de las pruebas experimentales no son esféricas hacen que queden pequeños huecos de aire libre en la matriz, cosa que no ocurre con las partículas esféricas de la simulación.



Figura 153. Foto detalle de las partículas usadas en las pruebas experimentales.

Para simular su rodadura o movimientos hemos añadido coeficientes de rodadura, pero no se han creado partículas formadas por varias esferas para simular su geometría, ya que no era el objetivo de este estudio y eso hacía que las simulaciones tuvieran un extra coste computacional.

6.2 Análisis de los mecanismos de segregación

Para analizar los mecanismos de segregación que se producen durante la descarga de un carro alimentador de una maquina compresora alternativa, se ha dividido la gráfica en 4 intervalos que serán analizados basándonos en los mecanismos que interfieren durante este ensayo.

Hay que mencionar que a lo largo de un ciclo completo de ensayo (real y simulado) todos los mecanismos de segregación actúan de forma combinada, aunque es verdad que con diferente influencia a lo largo del ensayo.

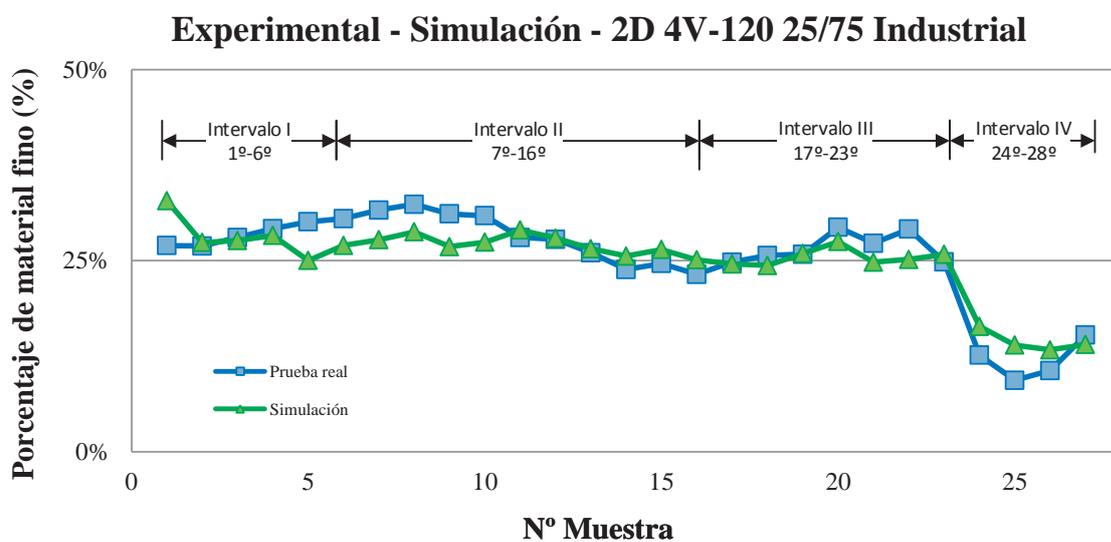


Figura 154. Porcentaje del ingrediente minoritario obtenido en las pruebas experimentales y simulación con el carro 4V-120 con una mezcla de 25% de partículas finas.

Durante el llenado del carro desde la tolva de alimentación se crea una segregación que se puede observar en el primer intervalo de la Figura 154.

La diferente geometría y composición de las partículas hace que se ubiquen con cierta segregación dentro del carro. Un coeficiente muy importante dentro de esta fase es el coeficiente de restitución que es el que tiene que ver con es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas y partículas y pared.

Esta segregación hace que las partículas finas se coloquen en mayor porcentaje en la zona baja del carro y haciendo que los primeros comprimidos (**intervalo I**) tengas un porcentaje mayor al 25% en partículas finas.

Como se puede observar en la Figura 155, se está generando una acumulación en la zona inferior (Ib) del carro de partículas finas, lo que genera una acumulación de partículas gruesas en la zona superior (Ia).

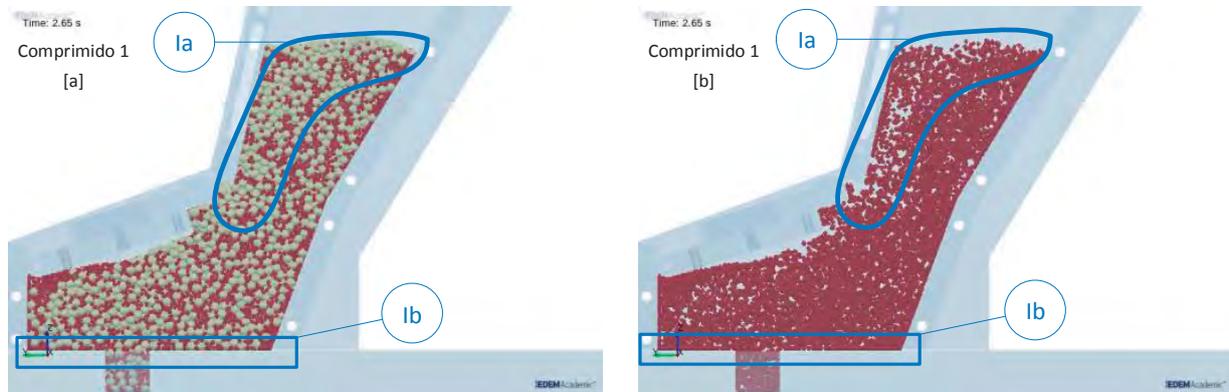


Figura 155. Foto del carro simulado en el comprimido 5. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.

En el **intervalo II** este porcentaje de partículas finas es incrementado por el fenómeno de percolación. Este fenómeno hace que las partículas finas vayan rellenando los huecos que generan las partículas más gruesas, desplazándose hacia zonas inferiores del carro y acumulándose en la base, lo que provoca que los comprimidos estén formados por un porcentaje superior al teórico (25%). El máximo porcentaje se obtiene en el comprimido número 11.

Como en el intervalo anterior, la acumulación de partículas finas (Figura 156) en la zona inferior (IIb) hace que se genere unas bolsas de partículas gruesas en la parte superior (IIa), fenómeno que se va acentuando con el paso del tiempo Figura 169.

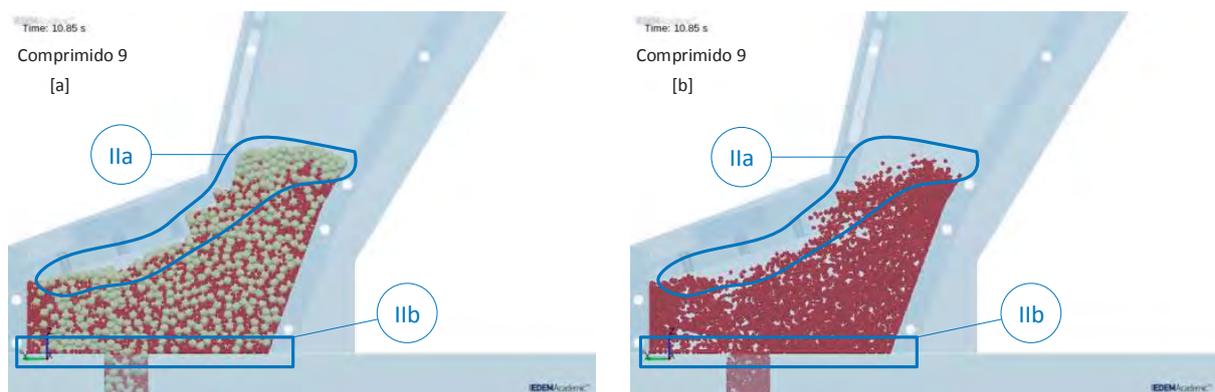


Figura 156. Foto del carro simulado en el comprimido 9. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.

El movimiento alternativo del carro acentúa este fenómeno de percolación que a su vez va generando una bolsa de partículas gruesas en la parte derecha del carro (IIa).

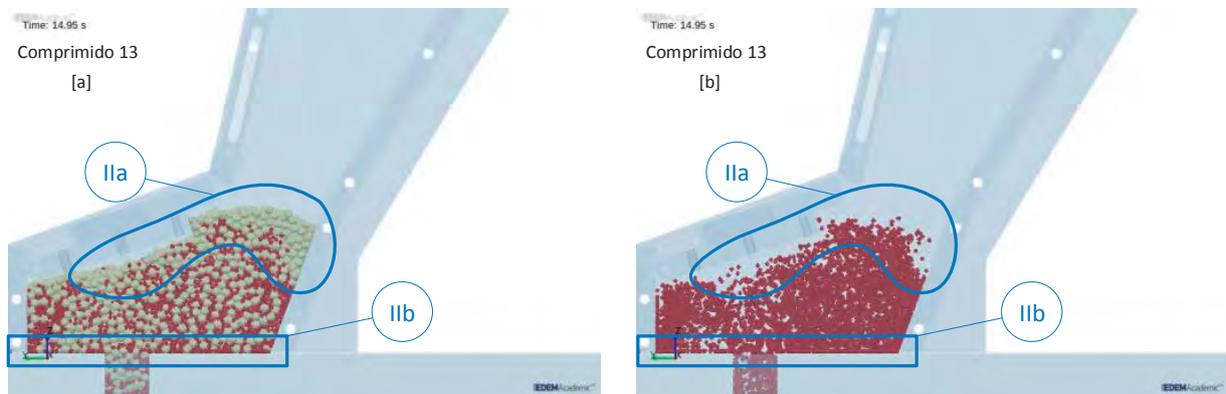


Figura 157. Foto del carro simulado en el comprimido 13. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.

En el intervalo I y II el fenómeno principal que causaba la segregación era la percolación por la que las partículas finas se colaban entre las gruesas hasta la parte inferior del carro, en el **intervalo III** este fenómeno ya no es tan acusado debido a que las partículas ya no están tan confinadas y tienen mayor libertad para los movimientos horizontales causados por el movimiento alternativo del carro.

En este intervalo la mezcla cercana a la matriz se mantiene bastante homogénea, por lo que los 6 comprimidos de este intervalo (experimental y simulación) se mantiene bastante cercanos al 25%.

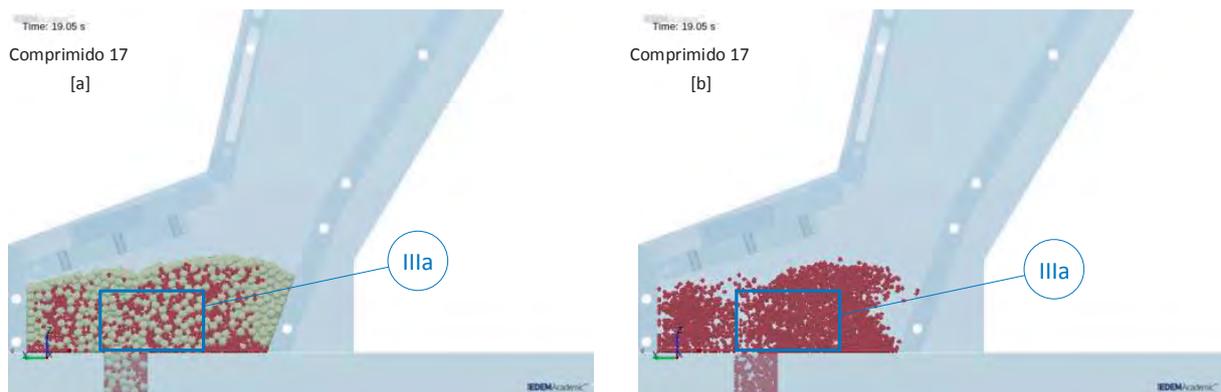


Figura 158. Foto del carro simulado en el comprimido 17. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.

Con el paso del tiempo se puede ir observando que esta zona de mezcla “perfecta” va agotándose con los sucesivos descargues de la matriz y va dejando paso a una zona

compuesta en su mayoría de partículas gruesas (IIIb). A la vez que la bolsa de partículas gruesas de la izquierda va descendiendo por la pared del carro (IIIc).

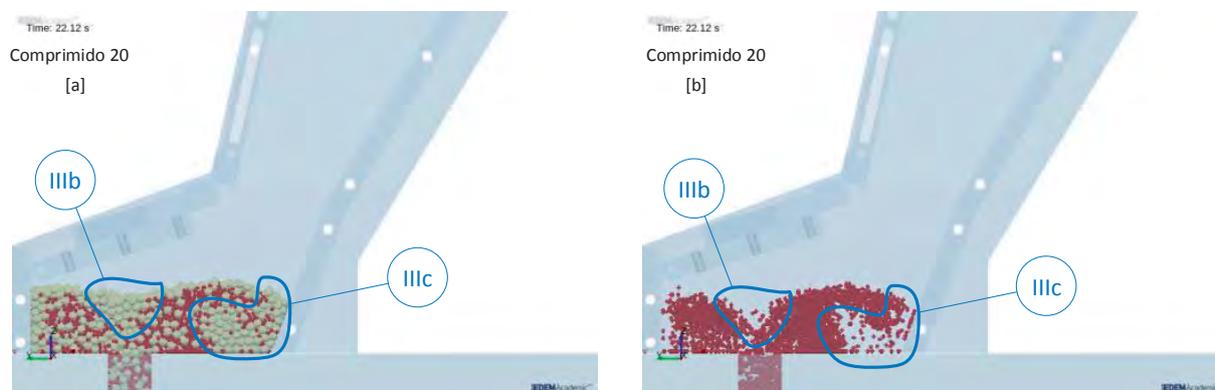


Figura 159. Foto del carro simulado en el comprimido 20. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.



Figura 160. Foto del carro simulado en el comprimido 23. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.

Llegados al **intervalo IV** se puede observar como hay una ausencia de partículas finas, lo que causa que la matriz este formada en su mayoría por partículas gruesas y eso se ve en la Figura 154 como hay una bajada de partículas finas hasta el 9.3 % de ellas en el comprimido 25.

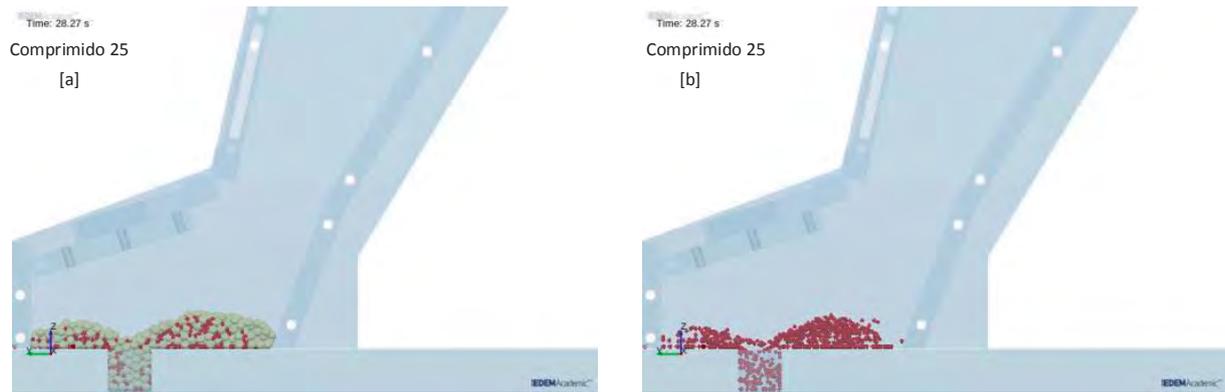


Figura 161. Foto del carro simulado en el comprimido 25. [Izda] Mezcla total [Dcha] Partículas finas.

6.3 Optimización del fenómeno de segregación

FASE III Optimización del fenómeno de segregación

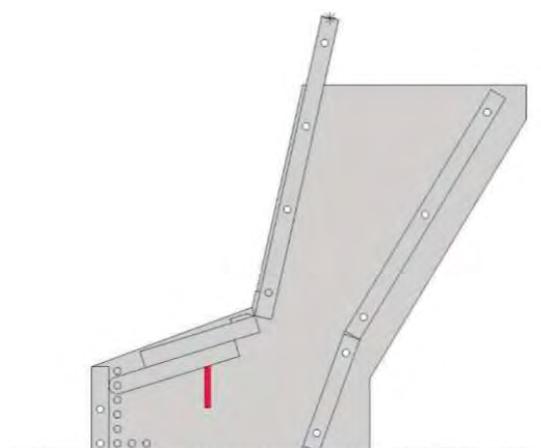
En la fase final, se realizan diversas simulaciones con el fin de introducir mejoras sobre las configuraciones del carro alimentador y así reducir la segregación producida

El carro usado para mejorar ha sido el de la configuración 4V-120, que es sobre la que se ha realizado el análisis de los mecanismos de segregación y sobre la que no se ha encontrado que sea la configuración óptima para ninguna de las mezclas analizadas.

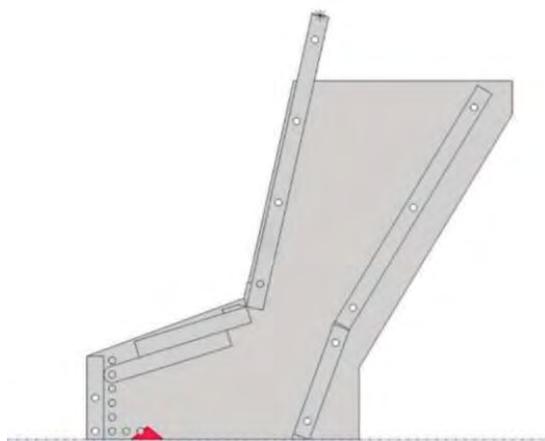
En las siguientes imágenes se pueden observar los diferentes injertos que se le han colocado al carro para tratar de minimizar la segregación que se produce durante la descarga.



Injerto 1



Injerto 2



Injerto 3



Injerto 4

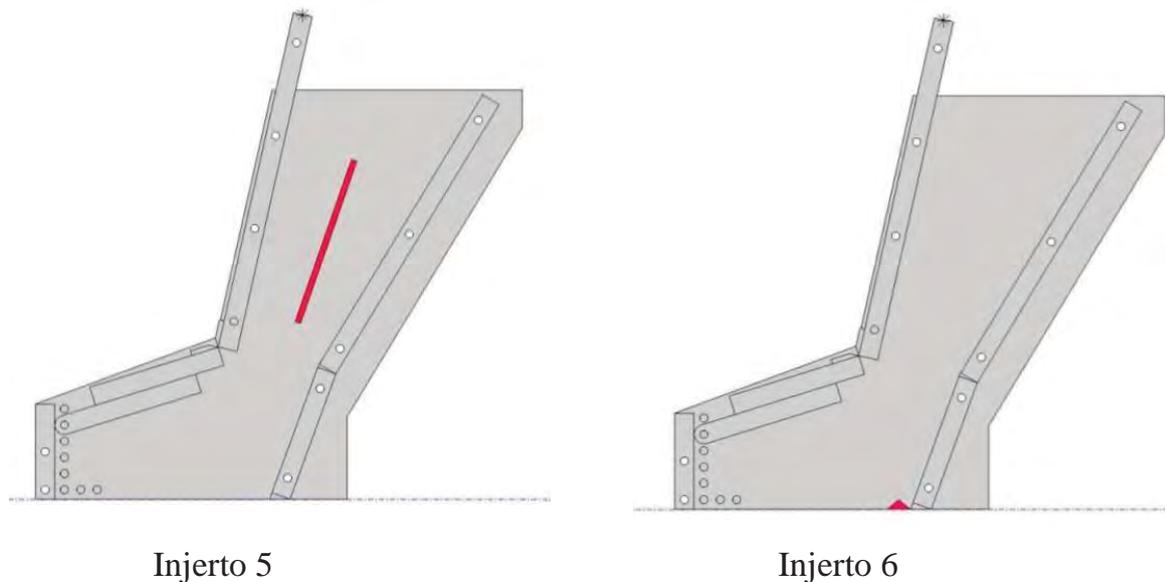
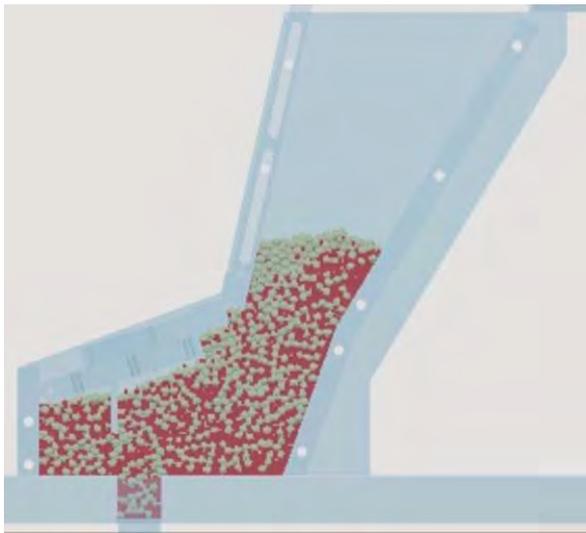


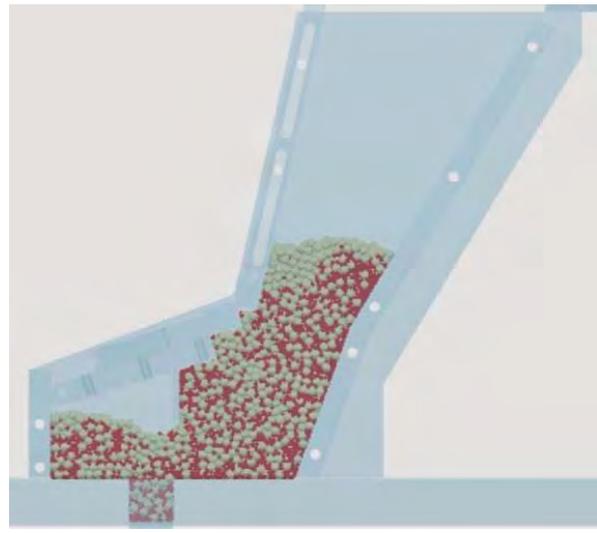
Figura 162. Carro alimentador en su configuración 4V-120 con los diferentes injertos colocados.

Este carro se ha simulado en las mismas condiciones que se simuló en carro en forma de zapato en su configuración 4V-120 con una mezcla formada por un 25% de partículas finas (sémola tostada) y un 75% de partículas gruesas (sémola).

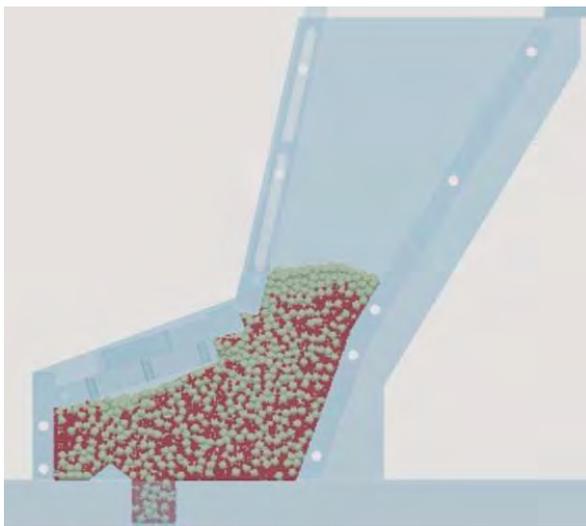
En las siguientes imágenes se puede ver el carro con los diferentes injertos durante la simulación del mismo y como los diferentes injertos actúan sobre la mezcla.



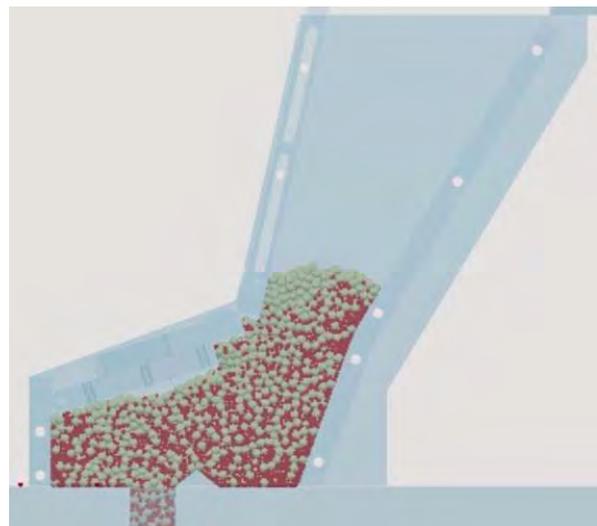
Simulación 4V-120 con el injerto 1



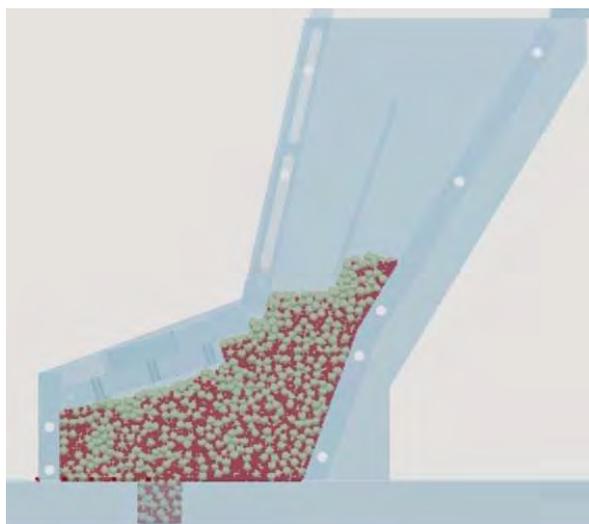
Simulación 4V-120 con el injerto 2



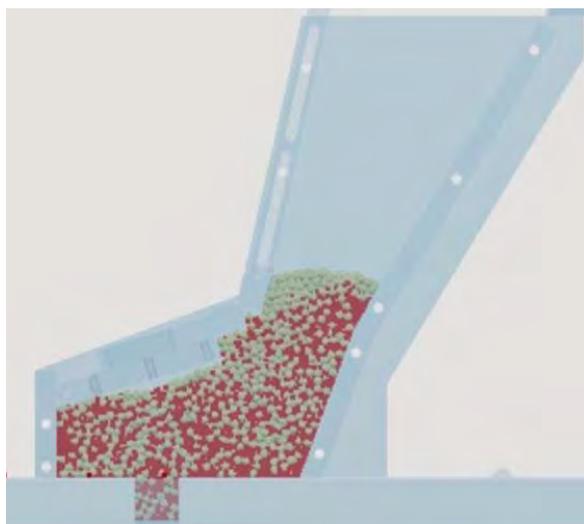
Simulación 4V-120 con el injerto 3



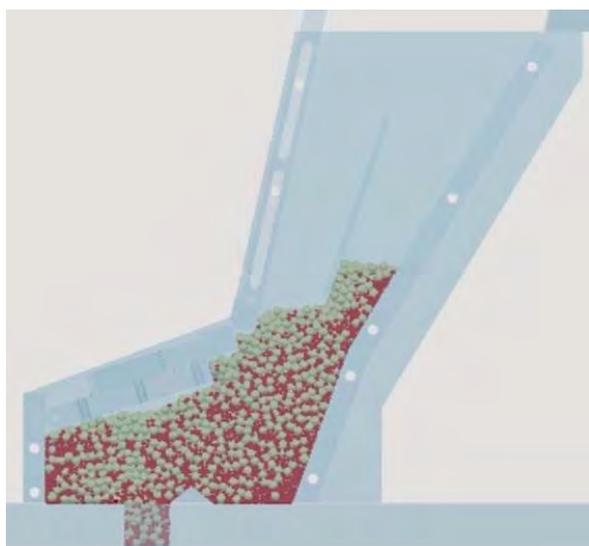
Simulación 4V-120 con el injerto 4



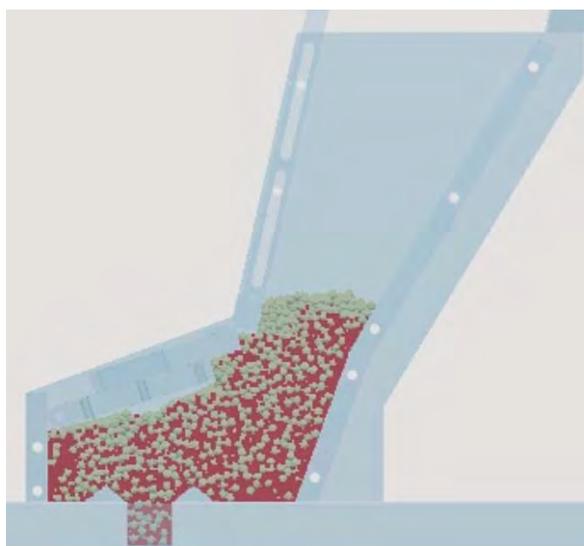
Simulación 4V-120 con el injerto 5



Simulación 4V-120 con el injerto 6



Simulación 4V-120 con el injerto 4+5



Simulación 4V-120 con el injerto 3+4

Figura 163. Carro alimentador en posición 4V-12 con los diferentes injertos.

Analizando la Figura 164, se puede observar como el injerto 1 afecta a la última fase de la descarga haciendo que haya una descarga más precoz de partículas gruesas lo que se contrarresta con un pico de partículas finas en el comprimido 25.

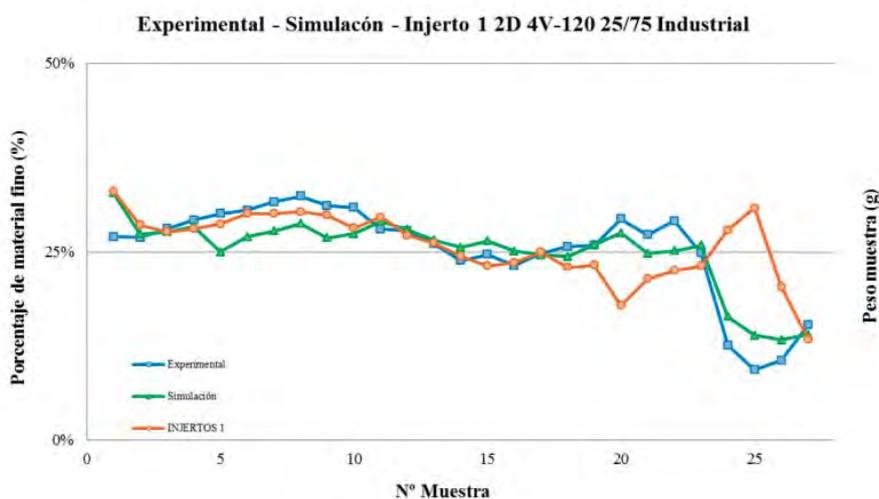


Figura 164. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con el injerto 1 colocado. Sémola-Sémola..

Analizando la Figura 165, se ve como el injerto dos ha mejorado la descarga de la mezcla considerablemente haciendo que la mezcla comience a acercarse a la mezcla teórica desde el comprimido 8 y se mantenga durante más tiempo estable

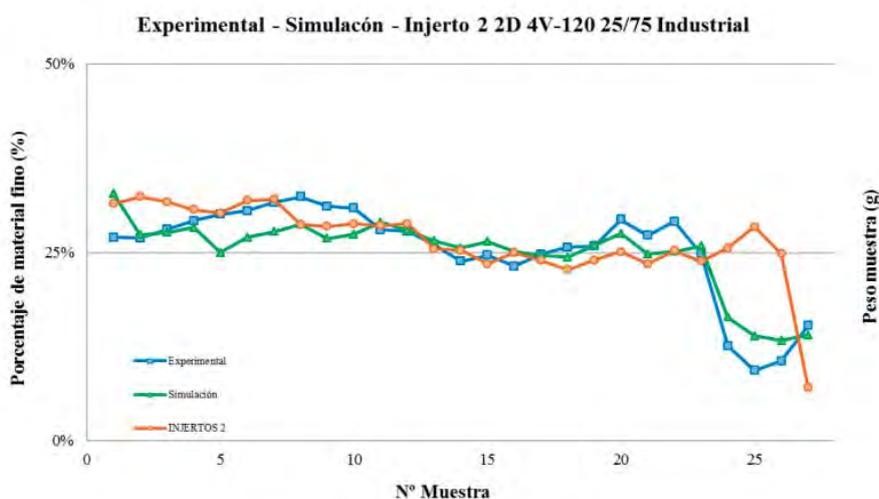


Figura 165. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con el injerto 2 colocado. Sémola-Sémola..

La Figura 166 mejora bastante la segregación que se produce en el carro 4V-120 y aunque no se mantenga tan cercana al 25% como el injerto 2 hace que sean prácticamente estable durante toda la prueba salvo en los últimos 6 comprimidos.

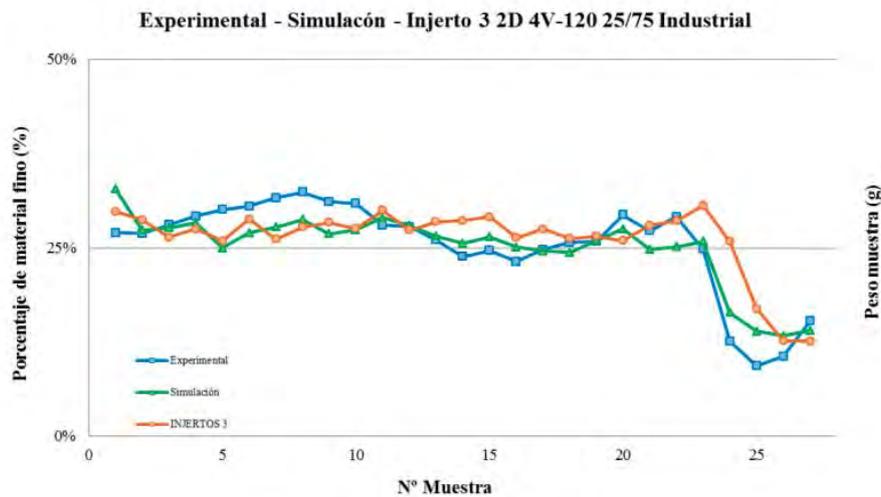


Figura 166. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con el injerto 3 colocado. Sémola-Sémola..

La Figura 167, muestra como el injerto 4 es uno de los mejores injertos, ya que suma el efecto de los dos injertos anteriores. Por un lado hace que la mezcla se mantenga estable prácticamente en toda la prueba y por otro lado está mucho más cerca de la mezcla teórica del 25%.

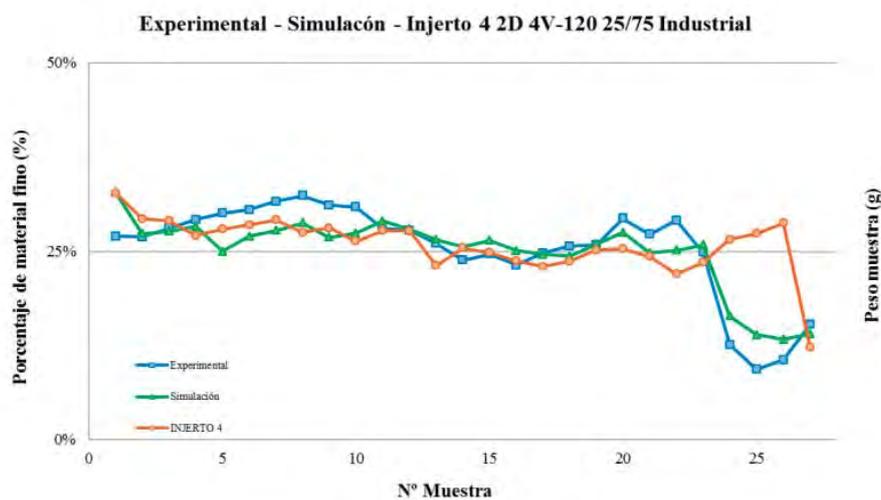


Figura 167. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con el injerto 4 colocado. Sémola-Sémola..

La pared colocada como injerto 5 quería evitar la segregación inicial que se produce en el carro cuando éste es llenado desde la tolva de alimentación, pero aunque si se puede

observar que esta segregación disminuye en los primeros comprimidos, no mejora en las siguientes muestras.

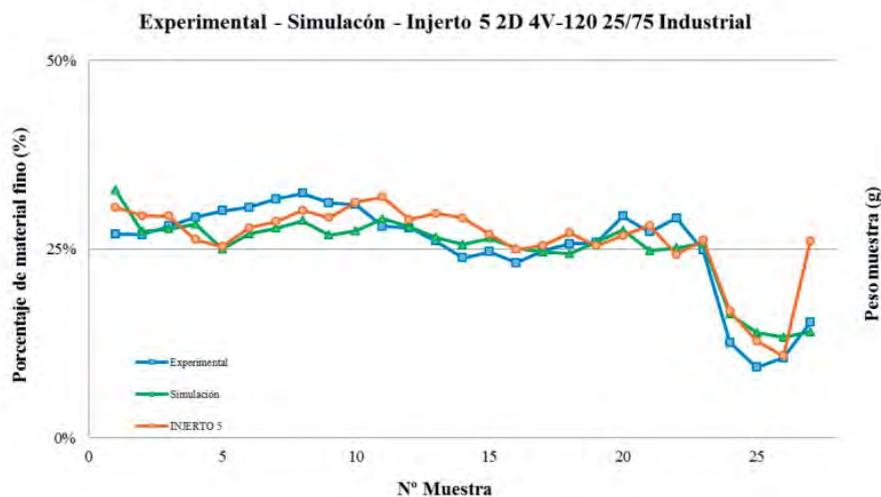


Figura 168. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con el injerto 5 colocado. Sémola-Sémola..

El injerto 6 es un injerto muy similar al injerto 4, solo que en esta ocasión se ha fijado a la base del carro para eliminar la bolsa de gruesos que desciende por la pared izquierda del carro.

Aunque sí parece efectivo a partir del comprimido 5, la variabilidad entre los comprimidos 1 y 4 hace que el error sea mayor que con ese injerto.

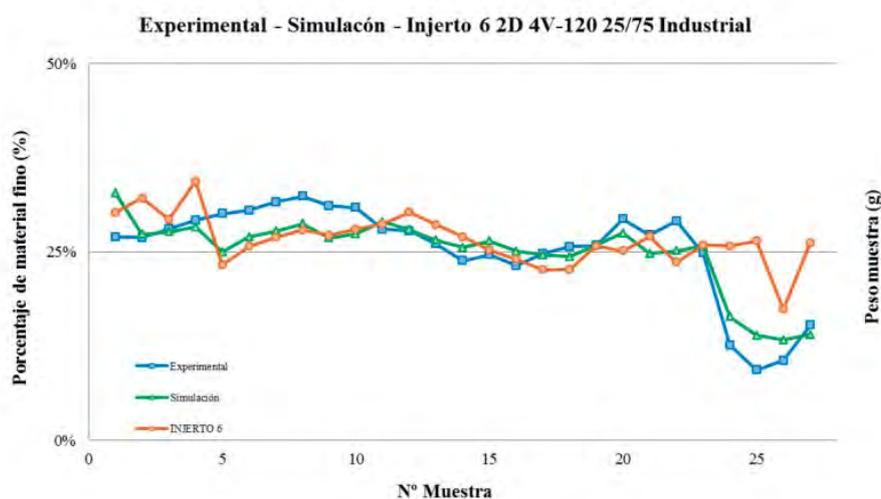


Figura 169. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con el injerto 6 colocado. Sémola-Sémola..

En estas últimas pruebas, se juntaron diferentes injertos para sumar sus efectos y poder disminuir en mayor forma la segregación.

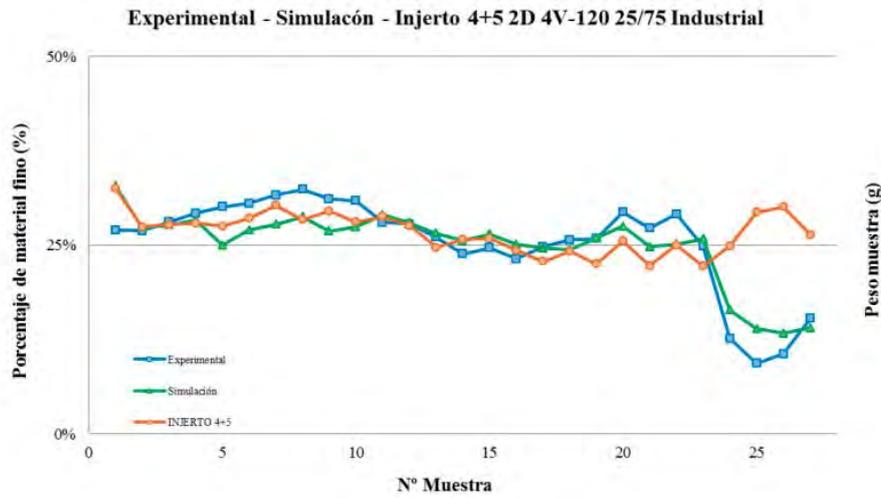


Figura 170. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con injertos 4 y 5 colocados. Sémola-Sémola.

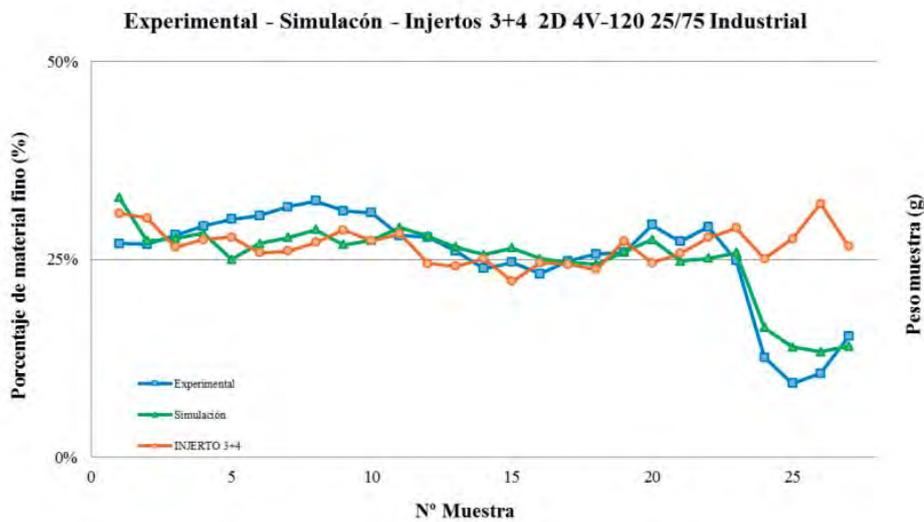


Figura 171. Simulación de la descarga del zapato en su configuración 4V-120 con con injertos 3 y 4 colocados. Sémola-Sémola.

Como resumen, en la Tabla 10 se puedes ver todos los errores cuadráticos medios de las simulaciones del carro 4V-120 con los diferentes injertos.

Modelo	RMSE (%)
Experimental	6,71
Simulación	4,34
Injerto 1	3,91
Injerto 2	3,88
Injerto 3	4,13
Injerto 4	2,88
Injerto 5	5,24
Injerto 6	3,69
Injerto 4+5	3,17
Injerto 3+4	2.84

Tabla 10. Error cuadrático medio obtenido durante la descarga del carro en su configuración 4V-120 con los diferentes injertos.

En la Figura 172 puede analizarse de una forma más gráfica cuáles de los injertos han minimizado el efecto de la segregación o cuáles incluso lo más incrementado.

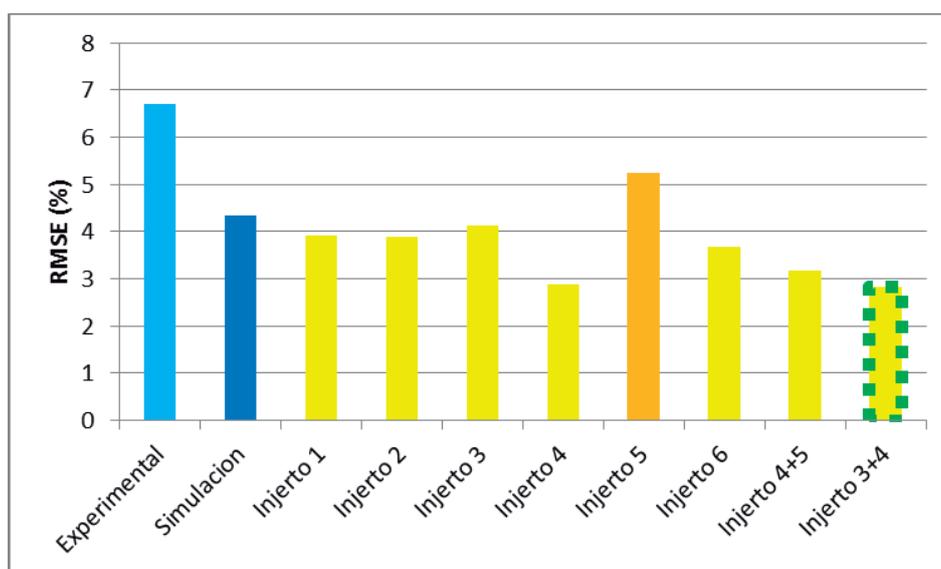


Figura 172. Error cuadrático medio obtenido durante la descarga del carro en su configuración 4V-120 con los diferentes injertos.

Como conclusión el injerto 3+4 ha mejorado la simulación, minimizando el efecto de la segregación en un 33%, pasando de un RMSE de 4.34% a un 2.84%.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

7 CONCLUSIONES

En la presente investigación se muestra una aplicación del método de los elementos discretos (DEM) en la que se ha llevado a cabo la simulación del proceso de vaciado completo del carro alimentador de una máquina compresora alternativa y en resumen se han alcanzado con éxito todos los objetivos planteados al comienzo del trabajo.

CONCLUSIONS CIENTIFICAS

- Se ha identificado un modelo de simulación que reproduce fielmente los fenómenos de segregación que se producen en un carro alternativo de un maquina compresora.

Los valores óptimos de las variables del proceso han sido determinadas a través de un proceso iterativo de calibración, con el que se han alcanzado errores cuadráticos medios (RMSE) aceptables y que son capaces de ser usados para todo tipo de geometrías y mezclas que se usen en el proceso.

- Por otro lado, también ha quedado demostrado que es factible usar un modelo “bidimensional”, que hace que las simulaciones tengan un coste computacional mucho menor que hace que los ensayos puedan realizarse en un 33% del tiempo que costaría realizar un ensayo 3D.
- También se han identificado y analizado los mecanismos de segregación que se producen en el carro y que explican los problemas de segregación de los comprimidos fabricados en este tipo de máquinas.

Se ha concluido que estos mecanismos de segregación son dependientes de la geometría del carro, naturaleza de los ingredientes de la mezcla, la propia mezcla...

Un ejemplo, y como conclusión de los ensayos anteriores se ha podido concluir que como efectivamente afirmaban ciertos autores, los carros con bases más alargadas poseen una mayor segregación que los carros con bases estrechas. En la Figura 173 se puede observar como de manera gráfica los carros horizontales tienen mayor segregación respecto a la mezcla teórica que los verticales.

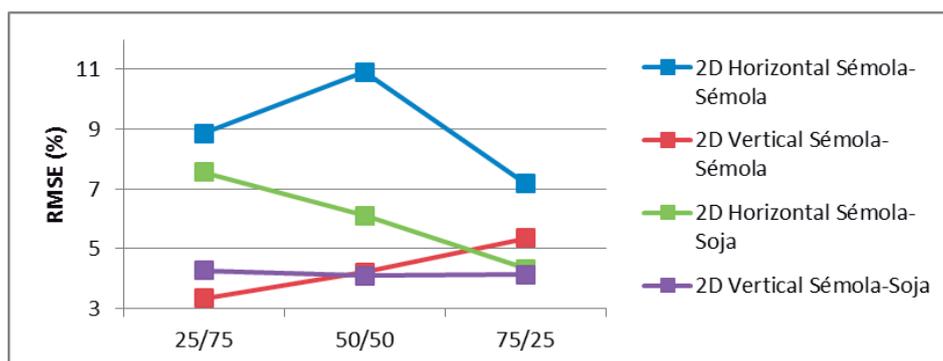


Figura 173. Error cuadrático medio obtenido durante la descarga del carro los carros vertical y horizontal con los valores teóricos de la mezcla.

- Empleando el modelo de simulación obtenido, se han propuesto medidas para mitigar la segregación, entre las que se encuentran la modificación de la geometría del carro o el empleo de injertos.

CONCLUSIONES TÉCNICAS

- Se ha diseñado un carro de geometría variable que permite adoptar diferentes formas para reducir la segregación en función de la mezcla de ingredientes que se emplea en cada caso
- Este diseño ha sido protegido mediante una patente nacional con examen previo, extendida y ya concedida a Japón y solicitada en USA y Unión Europea.

Ver documentación de las patentes adjuntas.

FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Gracias al modelo de simulación obtenido se pretende estudiar otras posibles medidas que permiten reducir aún más la segregación. Por ejemplo, se propone:

1. Modificar la geometría de la matriz/punzón.
2. Modificar la posición de la matriz
3. Estudiar el efecto de la velocidad lineal del carro en la segregación. En este caso en concreto, se pretende reducir la velocidad, y con objeto de no reducir la productividad aumentar el número de matrices/punzones/comprimidos por ciclo.
4. Aplicar el conocimiento adquirido para reducir la segregación en cualquier dispositivo que maneje mezclas de material granular (silos, depósitos...)

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

8 REFERENCIAS

- [1] Martínez Martínez, L.; Sainz García, E.; Muro Hernández, J.; Alba Elías, F.; González Marcos, A. "Segregation of a binary granular mixture in a feed shoe of a single punch press using DEM". En: 17th International Congress on Project Management and Engineering, 17-19 de julio de 2013, Logroño
- [2] Martínez-Martínez, L., Sainz-García, E., Muro-Hernández, J., González-Marcos, A. Simulación del fenómeno de segregación en un depósito de máquina compresora excéntrica mediante elementos discretos. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyecto, Valencia, Julio 2012.
- [3] Ketterhagen, W.R.; Curtis, J.S.; Wassgren, C.R.; Kong, A.; Narayan, P.J.; Hancock, B.C. "Granular segregation in discharging cylindrical hoppers: a discrete element and experimental study". *Chemical Engineering Science*, 2007. num. 62, p. 6423-6439.
- [4] Guo, Y. D.-Y. Wu, K.D. Kafui, C. Thornton. "3D DEM/CFD analysis of size-induced segregation during die filling". *Powder Technology*, 2010
- [5] Ketterhagen, W. R., Curtis, J. S., Wassgren, C. R., & Hancock, B. C. (2008). Granular segregation in discharging cylindrical hoppers: a discrete element and experimental study, wedge-shaped hoppers. *Powder Technology*, 179, 126-143.
- [6] Guo, Y., Wu, C. Y., Kafui, K. D., & Thornton, C. (2011). 3D DEM/CFD analysis of size-induced segregation during die filling, *Powder Technology*, 206, 177-188.
- [7] Reynolds, Osborne "On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations". *Philosophical Magazine Series*, 1885. Vol 5, num. 469. p. 20-127
- [8] Rosato, A., Strandburg, K. J., Prinz, F. y Swendsen, R. H. "Why the Brazil Nuts are On Top: Size Segregation of Particulate Matter by Shaking", *Physical Review Letters*, 1987. Num. 58, 1038.
- [9] Bagnold, Ralph A. "*Proceedings of the Royal Society*", London Series, 1954. A, 225, 49
- [10] Knight, J. B., Jaeger, H. M. y Nagel, S. "Vibration-Induced Size Separation in Granular Media: The Convection Connection", *Physical Review Letters*, 1993. Num.70, 3728

- [11] Möbius, M. E.; Lauderdale B. E.; Nagel, S. R. y Jaeger, H. R. "Size Separation of Granular Particles", *Nature*, 2001. Num. 414, 270
- [12] Möbius, M. E.; Cheng, X.; Karczmar, G. S.; Nagel, S. R.; Jaeger, H. M. "Intruders in the Dust: Air-Driven Granular Size Separation". *Physical Review Letters*, 2004. Num. 93, 198001.
- [13] Möbius, M. E. "Effect of air on granular size separation in a vibrated granular bed", *Physical Review E*, 2005. Num.72, 011304
- [14] Liao, C.-C.; Hsiao, S.-S.; Tsai, T.-H.; Tai, C.-H. "Segregation to mixing in wet granular matter under vibration". *Chemical Engineering Science*, 2010. num. 65, p. 1109-1116.
- [15] Yang, S.C. "Segregation of cohesive powders in a vibrated granular bed". *Chemical Engineering Science*, 2006. num. 61, p. 6180-6188.
- [16] Cundall, P.A. & Strack O.D.L. "A discrete numerical method for granular assemblies". *Geotechnique*, 1979, num. 2, p.47-65.
- [17] Serrano, A.A. & Rodríguez-Ortiz, J.M. "A contribution to the mechanics of heterogeneous granular media". *Proc. Symp. Plasticity and soil Mech.*, 1973, Cambridge.
- [18] Rodríguez-Ortiz, J.M. "Estudio del comportamiento de medios granulares heterogéneos mediante modelos discontinuos analógicos y matemáticos". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1974.
- [19] Cundall, P. A. & Strack, O.D.L. "A discrete numerical model for granular assemblies". *Geotechnique*, 1979, vol 29, num. 1, p. 112.
- [20] Cundall, P.A., "Computer simulations of dense sphere assemblies". *Micromechanics of granular materials*, 1988 p. 113-123.
- [21] Ishibashi, I., & Chen, Y.C. "Dynamic Shear Moduli and Their Relationship to Fabric of Granular Materials" *Micromechanics of Granular Materials*, 1988. Ed. by M. Satake and J. T. Jenkins, Elsevier, Amsterdam, Holland, p. 113-123.
- [22] Jenkijs, J.T. "Small strain iniaxial deformations of a granular materials in this volume".
- [23] Mindlin, R.D. & Deresiewicz. "Elastic spheres in contact under vorying oblique forces".

-
- [24] Gethin, D.T., Ransing, R.S., Lewins, R.W., Dutko, M., Crook, A.J.L. “Numerical comparison of a deformable discrete element model and an equivalent continuum analysis for the compaction of ductile porous materials”. *Computers and Structures*, 2001. num. 79, p. 1287-1294.
- [25] Gurson, A. L. “Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media”. *Trans ASME J Enin Mater Technol.* , 1977. num. 99, p. 2-15.
- [26] William R. K., Rahul B., Bruno C.H. “The coefficient of rolling resistance (CoRR) of some pharmaceutical tablets”. *International Journal of Pharmaceutics*, 2010. Num. 107-110.
- [27] Bharadwaj, R., Wassgren, C., Zenit, R. “The unsteady drag force on a cylinder immersed in a dilute granular flow”. *Phys. Fluids*, 2006. num.18.
- [28] Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., Wirtz, S., Scherer, V. “Review and extension of normal force models for the discrete element method”. *Powder Technology*, 2007. Num.171. p.157–173.
- [29] Ketterhagen, W.R., amEnde, M.T., Hancock, B.C. “Process modeling in the pharmaceutical industry using the discrete element method”. *Journal of Pharmaceutical Science*, 2009 num.98. p.442–470.
- [30] Kodam, M., Bharadwaj, R., Curtis, J., Hancock, B., Wassgren, C. “Force model considerations for glued-sphere discrete element method simulations”. *Chemical Engineer Science*, 2009. Num 64, p.3466–3475.
- [31] Tabor, D. “The mechanism of rolling friction. II. The elastic range”.. *Proc. R. Soc. Lond.* , 1955. Num.229 , p.198–220.
- [32] Ketterhagen, W.R., Curtis, J.S., Wassgren, C.R., Kong, A., Narayan, P.J., Hancock, B.C. “Granular segregation in discharging cylindrical hoppers: a discrete element and experimental study”. *Chemical Engineer Science*, 2007 num.62, p.6423–6439.
- [33] Beer, F.P., Johnson, E.R.. “Mechanics for Engineers—Statics and Dynamics”. New York, 1976.
- [34] Brilliantov, N.V., Pöschel, T. “Rolling friction of a viscous sphere on a hard plane”. *Europhys. Lett.*, 1998. Num 42, p.511–516.
- [35] Iwashita, K., Oda, M. “Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM”. *Journal of Engineer Mechanic*, 1998. num.124 , p.285–292.

- [36] Zhou, Y.C., Wright, B.D., Yang, R.Y., Xu, B.H., Yu, A.B.. “Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation”. *Physica A*, 1999. num.269, p.536–553.
- [37] Zhou, Y.C., Xu, B.H., Yu, A.B., Zulli, P. “An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres”. *Powder Technology*, 2002. Num. 125, p.45–54.
- [38] Estrada, N., Taboada, A., Radjaï, F. “Shear strength and force transmission in granular media with rolling resistance”. *Phys. Rev. E*, 2008. Num. 78
- [39] Ji, S.Y., Hanes, D.M., Shen, H.H. “Comparisons of physical experiment and discrete element simulations of sheared granular materials in an annular shear cell”. *Mech. Mater.*, 2009. Num.41, p. 764–776.
- [40] Foerster, S.F., Louge, M.Y., Chang, H., Allia, K. “Measurement of the collision properties of small spheres”. *Phys. Fluids*, 1994.num. 6, p. 1108–1115.
- [41] Gorham, D.A., Kharaz, A.H. “The measurement of particle rebound characteristics”. *Powder Technology*, 2000. Num. 112, p. 193–202.
- [42] Tomlinson, G.A. “A molecular theory of friction”. *Philos. Mag.*, 1929. Num.7, p. 905–939.
- [43] Beare, W.G., Bowden, F.P. “Physical properties of surfaces. I. kinetic friction”. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* , 1938. A234, 329–354.
- [44] Kudrolli, A., Wolpert, M., Gollub, J.P. “Cluster formation due to collisions in granular material”. *Phys. Rev. Lett.* , 1997. Num.78, p. 1383–1386.
- [45] Williams, J.A.. “Engineering Tribology”. Cambridge University Press, New York, 2005.
- [46] ASTM. “Standard Test Method for Measuring Rolling Friction Characteristics of a Spherical Shape on a Flat Horizontal Plane”. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. , 2009.
- [47] Hancock, B.C., Mojica, N., St.John-Green, K., Elliott, J.A., Bharadwaj, R., 2010. “An investigation into the kinetic (sliding) friction of some tablets and capsules”. *Int. J. Pharm*, 2009. Num.384 (1–2), p. 39–45.
- [48] Ketterhagen, W.R.; Hancock, B.C. "Optimizing the design of eccentric feed hoppers for tablet presses using DEM". *Computers and Chemical Engineering*, 2010. num. 34, p. 1072-1081.

- [49] Yu, Y.; Saxén, H. "Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model". *Chemical Engineering Science*, 2010. num. 65, p. 5237-5250.
- [50] Wu, J.; Binbo, J.; Chen, J.; Yang, Y. "Multi-scale study of particle flow in silos". *Advanced Powder Technology*, 2009. num. 20, p. 62-73.
- [51] Guo, Y.; Wu, C-Y.; Thornton, C. "The effects of air and particle density difference on segregation of powder mixtures during die filling". *Chemical Engineering Science*, 2011. num. 66, p. 661-673.
- [52] González-Montellano, C., Ramírez, Á., Gallego, E., Ayuga, F., Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(21), 5116-5126.
- [53] Ramírez-Aragón, C., Estudio mediante DEM de la segregación de una mezcla binaria en el carro alimentador de una maquina compresora rotativa. Universidad de La Rioja, curso 2014-2015.

PATENTES

PATENTE ESPAÑOLA

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 424 568**

21 Número de solicitud: 201300551

51 Int. Cl.:

B28B 13/02 (2006.01)

B30B 15/30 (2006.01)

B65G 47/18 (2006.01)

B65G 47/44 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

22 Fecha de presentación:

04.06.2013

43 Fecha de publicación de la solicitud:

04.10.2013

Fecha de la concesión:

21.04.2014

45 Fecha de publicación de la concesión:

28.04.2014

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD DE LA RIOJA (65.0%)

Avenida de la Paz 93

26006 Logroño (La Rioja) ES y

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (35.0%)

72 Inventor/es:

ALBA ELÍAS, Fernando;

MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Laura ;

GONZÁLEZ MARCOS, Ana y

ORDIERES MERE, Joaquín

54 Título: **Carro alimentador para máquina compresora y uso del mismo**

57 Resumen:

La invención describe un carro alimentador para máquina compresora, del tipo que presenta un extremo superior de llenado por el que se introduce un material particulado destinado a comprimirse en una matriz de la máquina compresora y un extremo inferior de descarga de dicho material particulado hacia dicha matriz. Al menos parte de los elementos constituyentes de dicho carro alimentador pueden desplazarse unos con respecto a otros, permitiendo así modificar la geometría de al menos uno de dicho extremo inferior de descarga, dicho extremo superior de llenado y una parte intermedia del carro alimentador entre ambos extremos. La invención también describe el uso de un carro alimentador de este tipo, que comprende las etapas iniciales de determinar la geometría de carro óptima para un material particulado que se desea comprimir y aplicar dicha geometría de carro óptima al carro alimentador.

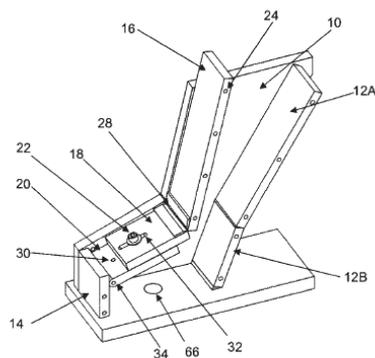


FIG. 1A

ES 2 424 568 B2

DESCRIPCIÓN

CARRO ALIMENTADOR PARA MÁQUINA COMPRESORA Y USO DEL MISMO

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere de manera general al campo de las máquinas compresoras, y más concretamente a un carro alimentador para máquinas compresoras.

Antecedentes de la invención

10 Las máquinas compresoras se usan ampliamente en diversos campos de la técnica, tales como por ejemplo en farmacia, en la preparación de vitaminas, piezas mecánicas compactadas, microelectrónica, etc. Las máquinas compresoras se emplean junto con un carro alimentador, que proporciona el material particulado de partida a una matriz de la máquina
15 compresora, en la que se comprime dicho material particulado para producir el artículo comprimido final.

Se conocen dos tipos principales de máquinas compresoras: las máquinas excéntricas y las rotatorias. Las máquinas excéntricas presentan una única matriz, dotada de una o más cámaras de compresión e insertada en una
20 pieza denominada platina. En este tipo de máquinas, la matriz permanece fija y el carro alimentador se desplaza con un movimiento que permite llenar la matriz con material particulado, enrasar la matriz eliminando el material particulado sobrante y expulsar el artículo comprimido final.

Por su parte, las máquinas compresoras rotatorias cuentan con varias
25 matrices y punzones insertados en una platina móvil circular. En este caso, el carro alimentador permanece fijo.

Al usar máquinas compresoras alimentadas mediante un carro o tolva, se produce un fenómeno denominado de segregación, que provoca un llenado no homogéneo de la matriz de la máquina compresora con material particulado.
30 Evidentemente, este fenómeno se agrava cuando el material particulado está constituido por una mezcla de partículas de diferentes materiales con diferentes propiedades. Este fenómeno de segregación resulta particularmente perjudicial en aplicaciones en las que es importante mantener una proporción específica de los diversos materiales empleados para la fabricación del artículo
35 comprimido final, tales como en la industria farmacéutica para la preparación de comprimidos.

Además también pueden producirse otras circunstancias perjudiciales

como problemas de compactación derivados de que unas partículas se quedan pegadas a las paredes y otras no, posibilidad de rotura de las pastillas al imprimir sobre ellas numeraciones, logotipos, etc.

Este fenómeno de segregación, que consiste en la agrupación de partículas similares, se produce mediante una combinación de diversos mecanismos:

- un mecanismo de condensación que se produce por la diferencia de densidad entre diversas partículas que componen el material particulado: las partículas más pesadas tienden a ubicarse en la parte inferior y las menos pesadas en la parte superior;
- un mecanismo de convección: se produce en mezclas de partículas de diferentes tamaños, que al someterse a ciertas condiciones de vibración experimentan un movimiento cíclico que hace que se acumulen en regiones localizadas;
- una segregación por percolación provocada por la entrada de partículas pequeñas en los espacios vacíos generados por partículas más grandes, en la dirección de la aceleración de la gravedad, hasta que la estructura granular tiende a ser localmente de partículas iguales; y
- una trayectoria de segregación por la que los efectos de fricción reducen las velocidades de las partículas más pequeñas o más angulares en una fina capa de material en movimiento.

Por tanto, la combinación de uno o más de los mecanismos anteriores provoca la segregación o separación de diversas partículas que componen un material particulado de partida a lo largo de su desplazamiento desde el carro alimentador hasta la matriz de la máquina compresora.

Durante el llenado del carro alimentador puede producirse un primer fenómeno de segregación dado que las partículas caen a distintas velocidades en función de sus propiedades, y también rebotan de distinta manera unas contra otras y contra las paredes del carro. Por tanto, las propiedades de las partículas (densidad, forma, tamaño, etc.), los coeficientes de fricción (estático y de rodamiento) y de restitución (en los contactos partícula-partícula y partícula-carro), la geometría del carro, etc. afectan a este primer fenómeno de segregación.

El continuo llenado de la(s) matriz/matrices también provoca un fenómeno de segregación, dado que las partículas se desplazan dentro del carro a distintas velocidades debido a los factores mencionados anteriormente.

En el caso de las máquinas compresoras excéntricas, en las que el carro alimentador se somete a un desplazamiento continuo tal como se mencionó anteriormente, este desplazamiento del carro provoca una segregación adicional de las partículas presentes en su interior por los factores
5 anteriormente mencionados.

Tal como se mencionó anteriormente, la geometría del carro alimentador influye sobre dichos fenómenos de segregación. Sin embargo, no es posible diseñar un carro alimentador con una geometría óptima universal que reduzca los fenómenos de segregación ya que dicha segregación también depende de
10 otros factores tales como las propiedades y proporciones de las diferentes partículas que componen el material particulado, etc.

El documento US 6764296 da a conocer un método de fluidización del contenido de un carro alimentador con objeto de reducir estos fenómenos de segregación. Los materiales particulados se hacen pasar a través de un
15 fluidizador que está dividido mediante una placa de distribución para formar una primera y una segunda cámara. Los materiales particulados pasan a través de dicha primera cámara que está en comunicación de gases con dicha segunda cámara por medio de la placa de distribución porosa. Se suministra gas a la segunda cámara a una presión suficiente para generar un cojinete de
20 gas entre la placa de distribución porosa y el material particulado. Se permite que el gas migre a través del material particulado, después se evacúa a la atmósfera circundante sin provocar turbulencias sustanciales en el material particulado.

Sin embargo, mediante el método dado a conocer en el documento US
25 6764296 resulta difícil controlar la homogeneización del material particulado y por tanto no es posible garantizar que los artículos comprimidos finales presenten la uniformidad de peso y composición necesaria.

Por tanto, sigue existiendo en la técnica la necesidad de un carro alimentador que permita reducir los fenómenos de segregación producidos
30 durante la fabricación de artículos comprimidos, obteniendo así una mejora en la uniformidad de peso y composición de dichos artículos comprimidos.

Sumario de la invención

La presente invención soluciona los problemas de la técnica anterior
35 dando a conocer un carro alimentador para máquina compresora cuya geometría puede variarse en función de las propiedades y proporciones de las partículas que componen el material particulado de partida, de modo que se

minimizan los fenómenos de segregación producidos dentro de dicho carro alimentador.

Concretamente, según un primer aspecto, la presente invención da a conocer un carro alimentador para máquina compresora, del tipo que presenta un extremo superior de llenado por el que se introduce un material particulado destinado a comprimirse en una matriz de la máquina compresora y un extremo inferior de descarga de dicho material particulado hacia dicha matriz. Al menos parte de los elementos que constituyen el carro alimentador de la presente invención pueden desplazarse unos con respecto a otros, permitiendo así modificar la geometría de al menos uno de dicho extremo inferior de descarga, dicho extremo superior de llenado y una parte intermedia del carro alimentador entre ambos extremos. El término "desplazarse" debe interpretarse de forma amplia, pudiendo referirse dicho término a "modificarse" la posición de los elementos del carro para modificar su geometría, "variar el diámetro" del carro para modificar su geometría o "variar" la sección del carro, entre otros conceptos equivalentes.

Según un segundo aspecto, la presente invención da a conocer un uso de un carro alimentador para máquina compresora según el primer aspecto de la presente invención. El uso según el segundo aspecto de la presente invención comprende las etapas de:

- determinar la geometría de carro óptima para un material particulado que se desea comprimir;
- aplicar dicha geometría de carro óptima al carro alimentador;
- llenar el carro alimentador con el material particulado; y
- accionar la máquina compresora para fabricar los artículos comprimidos.

Tal como se describirá a continuación en el presente documento, la determinación de la geometría de carro óptima puede realizarse mediante ensayos empíricos o mediante simulación informática.

Breve descripción de las figuras

La presente invención se entenderá mejor con referencia a las siguientes figuras que ilustran realizaciones preferidas de la invención, proporcionadas a modo de ejemplo, y que no deben interpretarse como limitativas de la invención de ninguna manera.

Las figuras 1A y 1B muestran vistas en perspectiva de un carro alimentador según una primera realización preferida de la presente invención.

Las figuras 2A y 2B muestran vistas en perspectiva de un carro alimentador según una segunda realización preferida de la presente invención.

Las figuras 3A y 3B muestran vistas en perspectiva de un carro alimentador según una tercera realización preferida de la presente invención.

5 La figura 4 muestra vistas en sección lateral de un carro alimentador según la primera realización preferida de la invención en cuatro configuraciones de geometría distintas.

La figura 5A muestra vistas en sección lateral de un carro alimentador según la primera realización preferida de la invención en dos configuraciones
10 de geometría distintas.

La figura 5B muestra vistas en sección lateral de un carro alimentador según la segunda realización preferida de la invención en dos configuraciones de geometría distintas.

La figura 5C muestra vistas en sección lateral de un carro alimentador según la tercera realización preferida de la invención en dos configuraciones de
15 geometría distintas.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Tal como se usa a lo largo del presente documento y en las
20 reivindicaciones adjuntas, el término "máquinas compresoras" se refiere a las máquinas empleadas en cualquier campo de la técnica para la preparación de artículos comprimidos (comprimidos farmacéuticos, vitaminas, piezas para microelectrónica, piezas compactadas estructurales, etc.) que pueden alimentarse con material particulado procedente de un carro alimentador.

25 Tal como se usa a lo largo del presente documento y en las reivindicaciones adjuntas, el término "material particulado" se refiere a cualquier tipo de material empleado para la preparación de artículos comprimidos mediante máquinas compresoras, independientemente del tamaño y la forma (cilíndrica, esférica, etc.) del mismo.

30 Haciendo ahora referencia a las figuras 1A y 1B, se describe un carro alimentador según una primera realización preferida de la presente invención. Este carro alimentador está constituido por dos placas laterales (10), dos placas traseras (12A, 12B) y una placa delantera inferior fija (14). Estos elementos permanecerán fijos e invariables para todas las geometrías
35 configurables del carro alimentador. Las placas traseras (12A, 12B) y la placa delantera inferior fija (14) se unen a las placas laterales (10) de manera clásica mediante tornillería. Sin embargo, el experto en la técnica entenderá que

pueden usarse otros medios de unión tales como soldadura, adhesivos, etc.

Con el fin de variar su geometría, el carro alimentador comprende además una placa delantera superior móvil (16), una primera placa delantera deslizante (18) y una segunda placa delantera deslizante (20).

5 La placa delantera superior (16) puede fijarse a ambas placas laterales (10) mediante tornillería (22) en una pluralidad de posiciones. Para ello, tal como puede apreciarse en la figuras 1A, la placa delantera superior (16) presenta una pluralidad de orificios roscados (24). Por su parte, tal como se observa en la figura 1B, las placas laterales (10) presentan un par de ranuras
10 (26). La tornillería se introduce a través de las ranuras (26) en el interior de los orificios roscados (24) para fijar la placa delantera superior (16) a las placas laterales (10) en la posición deseada.

Por su parte, la primera placa delantera deslizante (18) se une a la placa delantera superior (16) mediante una bisagra (28) que permite variar el ángulo
15 de inclinación formado entre ambas, proporcionando así un grado de libertad más para la variación de la geometría del carro alimentador.

La primera placa delantera deslizante (18) se une a la segunda placa delantera deslizante (20) mediante tornillería (22) a través de un orificio roscado (30) presente en la segunda placa delantera deslizante (20) y una
20 ranura (32) presente en la primera placa delantera deslizante (18), permitiendo dicha ranura (32) el deslizamiento relativo de una placa delantera deslizante con respecto a la otra. Según la realización preferida, la segunda placa delantera deslizante (20) presenta una pluralidad de orificios roscados (30), de modo que la primera placa delantera deslizante (18) y la segunda placa
25 delantera deslizante (20) pueden fijarse entre sí en una pluralidad de posiciones mediante tornillería (22) a través de la ranura (32) y uno cualquiera de la pluralidad de orificios roscados (30).

Por último, la segunda placa delantera deslizante (20) puede fijarse a ambas placas laterales (10) mediante tornillería (22) en una pluralidad de
30 posiciones. Para ello, la segunda placa delantera deslizante (20) presenta un orificio roscado (34) dispuesto para coincidir con uno de una pluralidad de orificios (36) presentes en las placas laterales (10). Así, tal como se describirá a continuación en el presente documento, dependiendo de en cuál de la pluralidad de orificios (36) de las placas laterales (10) se fije el orificio roscado
35 (34) de la segunda placa delantera deslizante (20), el carro alimentador presentará una geometría diferente que influirá sobre los fenómenos de segregación experimentados por el material particulado en su interior.

Según la realización mostrada en las figuras 1A y 1B, la segunda placa delantera deslizante (20) puede fijarse a las placas laterales (10) en ocho configuraciones geométricas diferentes, con lo cual se proporciona una gran variedad de elección de la geometría del carro alimentador con el fin de reducir al mínimo los fenómenos de segregación producidos. Evidentemente, el experto en la técnica entenderá que esta realización no es limitativa y que pueden diseñarse otros carros alimentadores según la presente invención con más o menos configuraciones geométricas posibles.

Haciendo ahora referencia a las figuras 2A y 2B adjuntas, se muestra una segunda realización preferida del carro alimentador de la presente invención. Según esta segunda realización, el carro alimentador está constituido por dos placas laterales (38), una placa delantera (40) y una placa trasera (42). Cada placa lateral (38) presenta una ranura superior (44) y una ranura inferior (46). La placa delantera (40) y la placa trasera (42) presentan, cada una, un orificio roscado de fijación inferior (48) y una pluralidad de orificios roscados de fijación superiores (50) para fijar dichas placas delantera (40) y trasera (42) a las placas laterales (38) en una pluralidad de posiciones mediante tornillería (52) a través de las ranuras inferiores (46) y superiores (44), respectivamente.

Por tanto, el carro alimentador según esta segunda realización preferida de la invención permite variar la geometría completa del mismo desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga.

Tal como puede observarse en la figuras 2A, las paredes laterales (38) también comprenden una ranura intermedia (54) cuya función es adaptar el carro alimentador para su uso según una tercera realización preferida de la presente invención descrita a continuación en el presente documento. Dado que según esta segunda realización preferida de la presente invención dicha ranura intermedia (54) carece de utilidad, se cubre con una tapa (56) para evitar que se escape material particulado a través de dicha ranura intermedia (54).

Haciendo ahora referencia a las figuras 3A y 3B, se muestra una tercera realización preferida del carro alimentador de la presente invención. En este caso, la composición del carro alimentador es sustancialmente similar a la del carro alimentador según la segunda realización preferida de la presente invención descrita anteriormente, con la diferencia de que comprende además un tubo interior (58) que recorre el carro alimentador desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga. El tubo interior (58) está

destinado a contener en su interior el material particulado. El tubo interior (58) presenta una primera abrazadera (60) en su extremo superior, una segunda abrazadera (62) en su extremo inferior y una abrazadera intermedia (64). Cada abrazadera (60, 62, 64) comprende al menos un orificio roscado para su
5 fijación mediante tornillería a las placas laterales (38) a través de las ranuras superiores (44), inferiores (46) e intermedias (54), respectivamente, en una pluralidad de posiciones.

Según otra realización de la presente invención, el carro alimentador está constituido por un tubo (58), preferiblemente de un material flexible que
10 permite su flexión pero lo suficientemente rígido para que mantenga la posición fijada. Dicho tubo (58) presenta unos medios de fijación que permiten variar la geometría completa del carro alimentador. Dichos medios de fijación pueden ser una primera abrazadera (60) en su extremo superior y una segunda
15 abrazadera (62) en su extremo inferior, aunque se permiten otros medios de fijación equivalentes, mediante lo cual se proporcionan puntos de fijación que permiten variar la geometría completa del carro alimentador desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga. Para fijar el tubo y poder determinar su geometría mediante los parámetros indicados en la presente memoria, dicho tubo se puede fijar a una placa lateral (38) que
20 presenta una ranura superior (44) y una ranura inferior (46), donde se puede fijar el tubo mediante las abrazaderas (60, 62). El carro alimentador puede comprender una abrazadera intermedia (64) para proporcionar otro punto de fijación.

El experto en la materia, comprenderá que el tubo (58) puede ser de
25 sección circular, cuadrada u otro tipo de sección conveniente. Al mismo tiempo, dicha sección puede permanecer constante o variar a lo largo del recorrido del tubo, en función de las necesidades.

Así, el carro alimentador según la presente invención (mostrada a modo de ejemplo según las realizaciones preferidas de la misma) permite variar la
30 geometría interior del mismo (ya sea en su extremo inferior o a lo largo de todo el recorrido interno del carro alimentador) con el objetivo de encontrar una geometría óptima que minimice los efectos de segregación para cada material particulado específico que esté empleándose. De esta forma, al comprimir el material particulado en una matriz (66) de la máquina compresora, se obtienen
35 los comprimidos uniformes en peso y composición.

La presente invención también da a conocer el uso de un carro alimentador para máquina compresora tal como cualquiera de los descritos

anteriormente en el presente documento. El uso según la presente invención comprende las etapas de:

- determinar la geometría de carro óptima para un material particulado que se desea comprimir;
- 5 - aplicar dicha geometría de carro óptima al carro alimentador;
- llenar el carro alimentador con el material particulado; y
- accionar la máquina compresora para fabricar los artículos comprimidos.

La etapa de determinar la geometría de carro óptima puede realizarse de
 10 manera empírica llevando a cabo una serie de ensayos hasta conseguir dicha geometría óptima, o mediante simulación informática. Concretamente, según una realización preferida de la presente invención, la etapa de determinar la geometría de carro óptima comprende:

- a) aplicar una primera geometría al carro alimentador;
- 15 b) fabricar artículos comprimidos con dicha primera geometría;
- c) analizar la composición de los artículos comprimidos;
- d) repetir las etapas a)-c) para una pluralidad de geometrías de carro distintas; y
- e) determinar la geometría óptima para el material particulado
 20 empleado de entre la pluralidad de geometrías aplicadas al carro alimentador.

Según una segunda realización preferida de la presente invención, la etapa de determinar la geometría de carro óptima comprende:

- a) introducir parámetros que afectan a la segregación del material
 25 particulado en el carro alimentador en un software informático;
- b) realizar simulaciones de segregación del material particulado con diversas geometrías del carro alimentador mediante dicho software informático; y
- c) determinar la geometría óptima para el material particulado
 30 empleado de entre la pluralidad de geometrías simuladas para el carro alimentador.

El software informático realiza preferiblemente dicha simulación basándose en el método de los elementos discretos (DEM, *discrete element method*). El método DEM se utiliza en la técnica para estudiar los fenómenos
 35 de segregación. Es un método eficaz para abordar la ingeniería en materiales granulares y discontinuos, y es especialmente útil para el estudio de flujos de partículas granulares, la mecánica de polvos y la mecánica de rocas.

Los parámetros que afectan a la segregación del material particulado en el carro alimentador y que deben introducirse en el software informático para permitir realizar dicha simulación incluyen por ejemplo las dimensiones y la densidad del material particulado, así como preferiblemente también el
 5 coeficiente de restitución, el coeficiente de fricción estático y el coeficiente de fricción de rodadura entre las partículas del material particulado y entre el material particulado y el carro alimentador.

A continuación se describen dos ejemplos ilustrativos y no limitativos de determinación de la geometría de carro óptima para un carro alimentador
 10 según la presente invención.

Ejemplo 1

En este primer ejemplo, se estudiaron mezclas con dos componentes: C1 y C2. El componente C1 fueron cilindros de 1,6 mm de diámetro y 1,6 mm de altura, y con una densidad de 1104 kg/cm³. El componente C2 fueron
 15 cilindros de 2,1 mm de diámetro y 3,4 mm de altura, y con una densidad de 1021 kg/cm³. Se estudiaron tres mezclas de estos componentes C1/C2: 75%/25%, 25%/75% y 50%/50%.

En la figura 4, se muestran las cuatro geometrías de carro estudiadas para determinar la geometría óptima para cada una de esas mezclas. En todas las simulaciones, se reprodujo el movimiento alternativo de un carro alimentador real en cuanto a desplazamientos, tiempos, velocidades y aceleraciones. Las geometrías estudiadas fueron:

4V-120: La segunda placa delantera deslizante fijada al orificio 4 vertical de las placas laterales. La primera placa delantera deslizante y la placa
 25 delantera superior forman un ángulo de 120°.

2V-120: La segunda placa delantera deslizante fijada al orificio 2 vertical de las placas laterales. La primera placa delantera deslizante y la placa delantera superior forman un ángulo de 120°.

30 2H-150: La segunda placa delantera deslizante fijada al orificio 2 horizontal de las placas laterales. La primera placa delantera deslizante y la placa delantera superior forman un ángulo de 150°.

0H-130: La segunda placa delantera deslizante fijada al orificio 0 (orificio de esquina) de las placas laterales. La primera placa delantera deslizante y la
 35 placa delantera superior forman un ángulo de 130°.

Para cada simulación se determinó la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) correspondiente, por un lado, a los primeros 50 comprimidos

obtenidos y, por otro lado, a los comprimidos 20-50 obtenidos en el denominado régimen nominal. En efecto, al llenar el carro alimentador en parada se produce un primer fenómeno de segregación que afecta aproximadamente a los primeros 20 comprimidos. Los comprimidos 20-50 se ven afectados únicamente por la segregación propia del movimiento alternativo del carro alimentador.

La tabla 1 a continuación muestra el RMSE entre el porcentaje teórico del componente de referencia y el porcentaje real de dicho componente de referencia en los 50 primeros comprimidos. De este modo, el RMSE refleja el grado de segregación que se produce en el proceso, de tal manera que cuanto menor es el RMSE, menor segregación se ha producido. Por lo tanto, los valores en negrita indican la geometría de carro óptima.

Tabla 1

Porcentaje de componentes	Configuración				Componente de referencia (porcentaje teórico)
	4V-120	2V-120	2H-150	0H-130	
75/25	6,40	3,97	4,02	3,49	C2 (25%)
25/75	6,02	3,68	4,26	3,78	C1 (25%)
50/50	7,87	4,88	4,50	4,85	C1/C2 (50%)

15

La tabla 2 a continuación muestra el RMSE entre el porcentaje teórico del componente de referencia y el porcentaje real de dicho componente de referencia del comprimido 20 al comprimido 50. Los valores en negrita indican la geometría de carro óptima.

20

Tabla 2

Porcentaje de componentes	Configuración				Componente de referencia (porcentaje teórico)
	4V-120	2V-120	2H-150	0H-130	
75/25	4,34	2,38	3,36	2,15	C2 (25%)
25/75	3,17	2,02	3,87	1,88	C1 (25%)
50/50	5,03	2,37	4,26	2,53	C1/C2 (50%)

Tal como puede observarse a partir de las tablas anteriores, la

configuración de carro óptima varía con la proporción de las diferentes partículas que constituyen el material particulado usado como materia prima. Por tanto, se demuestra la necesidad de un carro de geometría variable como el dado a conocer de manera novedosa por la presente invención que pueda adaptarse y proporcionar una configuración óptima para cada composición de material particulado diferente que se use como materia prima.

Ejemplo 2

Se realizaron simulaciones similares a las del ejemplo 1 mediante el método de los elementos discretos. En este caso, las partículas que componían el material particulado fueron:

Componente C1: Esferas de 2 mm de diámetro y con una densidad de 1150 kg/cm³.

Componente C2: Esferas de 4 mm de diámetro y con una densidad de 1150 kg/cm³.

En este caso se tuvieron en cuenta en la simulación informática de otros parámetros adicionales que también afectan a los fenómenos de segregación que se producen en el interior del carro alimentador. Estos parámetros se resumen en la tabla 3 a continuación:

Tabla 3

		C1	C2
Coeficiente de restitución	Partícula-carro	0,2	0,2
	Partícula-partícula	0,7	0,7
Coeficiente de fricción estático	Partícula-carro	0,5	0,5
	Partícula-partícula	0,5	0,5
Coeficiente de fricción de rodadura	Partícula-carro	0	0
	Partícula-partícula	0,5	0,5

Se estudiaron tres proporciones distintas de los componentes C1/C2: 15%/85%, 85%/15% y 50%/50%, en dos geometrías distintas de cada una de las tres realizaciones preferidas del carro alimentador de la presente invención descritas anteriormente en el presente documento (figuras 1A, 1B; 2A, 2B; y 3A, 3B respectivamente).

Las figuras 5A, 5B y 5C adjuntas muestran, cada una, las dos configuraciones estudiadas de los carros alimentadores según las diversas realizaciones preferidas de la presente invención. Las cotas incluidas en dichas

figuras constituyen las disposiciones geométricas exactas de estudio.

Las tablas 4, 5 y 6 a continuación muestran los resultados del RMSE obtenidos para cada una de las configuraciones estudiadas para cada una de las configuraciones de carro alimentador. Una vez más, los valores en negrita indican la geometría de carro óptima para cada caso.

Tabla 4: Primera realización del carro alimentador

Porcentaje de componentes	Configuración		Componente de referencia (porcentaje teórico)
	A	B	
C1/C2			
15/85	5,822	6,293	C1 (15%)
85/15	6,401	5,433	C2 (15%)
50/50	8,818	7,024	C1 (50%)

Tabla 5: Segunda realización del carro alimentador

Porcentaje de componentes	Configuración		Componente de referencia (porcentaje teórico)
	A	B	
C1/C2			
15/85	7,718	4,178	C1 (15%)
85/15	6,648	8,586	C2 (15%)
50/50	6,138	7,626	C1 (50%)

10

Tabla 6: Tercera realización del carro alimentador

Porcentaje de componentes	Configuración		Componente de referencia (porcentaje teórico)
	A	B	
C1/C2			
15/85	2,471	3,911	C1 (15%)
85/15	5,293	5,277	C2 (15%)
50/50	4,339	6,022	C1 (50%)

Aunque se ha descrito la presente invención con referencia a varias realizaciones preferidas de la misma, el experto en la técnica entenderá que pueden aplicarse modificaciones y variaciones a las mismas sin por ello apartarse del espíritu y el alcance de la presente invención.

Por ejemplo, aunque se han descrito varias realizaciones de carros alimentadores para máquinas compresoras cuya geometría puede variarse según diversas configuraciones, debe entenderse que la invención no se limita a dichas realizaciones y que se refiere de manera general a un carro alimentador para máquina compresora del tipo que presenta un extremo

20

superior de llenado por el que se introduce un material particulado destinado a comprimirse en una matriz de la máquina compresora y un extremo inferior de descarga de dicho material particulado hacia dicha matriz, siempre que al menos parte de los elementos constituyentes de dicho carro alimentador
5 puedan desplazarse unos con respecto a otros, permitiendo así modificar la geometría de al menos uno de dicho extremo inferior de descarga, dicho extremo superior de llenado y una parte intermedia del carro alimentador entre ambos extremos. En la práctica, pudiendo definir todos los parámetros geométricos del carro, que puede presentar diferentes variaciones en su forma
10 (sea cual sea su forma, es posible determinar/calcular su geometría), pudiendo definir los diferentes parámetros de la propia mezcla a comprimir y otros parámetros de efectos mecánicos del proceso, se posibilita mediante un software o medios empíricos determinar dicha geometría óptima del carro, lo que reduce de manera significativa el efecto de segregación del material
15 comprimido. Una vez determinada la geometría óptima, se configura el carro convenientemente, según los datos determinados.

Asimismo, aunque se ha descrito un carro alimentador según la primera realización preferida de la invención que presenta dos placas traseras, debe entenderse que realizaciones adicionales de dicho carro alimentador pueden
20 presentar una única placa trasera, o más de dos placas traseras, sin por ello apartarse del alcance de la invención.

Del mismo modo, aunque se ha descrito un carro alimentador según la tercera realización preferida de la invención que presenta una ranura intermedia y una abrazadera intermedia, debe entenderse que otras
25 realizaciones del carro alimentador pueden carecer de dichas ranura intermedia y abrazadera intermedia.

Los diversos elementos constituyentes del carro alimentador de la presente invención pueden ser cualquier material adecuado y usado habitualmente en la técnica, tal como por ejemplo acero. En caso de
30 comprender un tubo interior, éste puede fabricarse de cualquier material adecuado, tal como polietileno, PVC, acero, etc.

El carro alimentador de la presente invención puede presentar inscripciones numéricas, angulares, etc. para facilitar la configuración de las diversas geometrías posibles del mismo por parte del usuario.

35 El carro alimentador de la presente invención puede aplicarse a cualquier tipo de máquina compresora adecuado, ya sea de tipo excéntrico o rotatorio.

REIVINDICACIONES

1. Carro alimentador para máquina compresora, del tipo que presenta un extremo superior de llenado por el que se introduce un material particulado destinado a comprimirse en una matriz de la máquina compresora y un extremo inferior de descarga de dicho material particulado hacia dicha matriz, caracterizado por que al menos parte de los elementos constituyentes de dicho carro alimentador pueden desplazarse unos con respecto a otros, permitiendo así modificar la geometría de al menos uno de dicho extremo inferior de descarga, dicho extremo superior de llenado y una parte intermedia del carro alimentador entre ambos extremos.
2. Carro alimentador según la reivindicación 1, caracterizado por que está constituido por dos placas laterales (10), al menos una placa trasera (12A, 12B), una placa delantera inferior fija (14), una placa delantera superior móvil (16), una primera placa delantera deslizante (18) y una segunda placa delantera deslizante (20); que permiten variar la geometría del carro alimentador.
3. Carro alimentador según la reivindicación 2, caracterizado por que:
- la placa delantera superior (16) puede fijarse a cada placa lateral (10) en una pluralidad de posiciones mediante tornillería (22) a través de una pluralidad de orificios roscados (24) en la placa delantera superior (16) y una pluralidad de ranuras (26) correspondientes en cada placa lateral (10);
 - la primera placa delantera deslizante (18) se une a la placa delantera superior (16) mediante una bisagra (28) que permite variar el ángulo de inclinación formado entre ambas;
 - la primera placa delantera deslizante (18) se une a la segunda placa delantera deslizante (20) mediante tornillería (22) a través de un orificio roscado (30) presente en una de la primera o la segunda placas delanteras deslizantes y una ranura (32) presente en la otra de la segunda o la primera placas delanteras deslizantes, permitiendo dicha ranura (32) el deslizamiento relativo de una placa delantera deslizante con respecto a la otra;
 - la segunda placa delantera deslizante (20) puede fijarse a cada placa lateral (10) en una pluralidad de posiciones mediante tornillería (22) a través de un orificio roscado (34) en la segunda placa delantera deslizante (20) y uno de una pluralidad de orificios (36) en cada placa

lateral (10);

mediante lo cual las diversas posiciones de fijación posibles de la placa delantera superior (16), la primera placa delantera deslizante (18) y la segunda placa delantera deslizante (20) permiten variar la geometría del extremo inferior de descarga del carro alimentador.

5

4. Carro alimentador según cualquiera de las reivindicaciones 2 ó 3, caracterizado por que la primera placa delantera deslizante (18) presenta una ranura (32) y la segunda placa delantera deslizante (20) presenta una pluralidad de orificios roscados (30) permitiendo la fijación de la primera placa delantera deslizante (18) y la segunda placa delantera deslizante (20) mediante tornillería (22) a través de uno cualquiera de dicha pluralidad de orificios roscados (30) y de la ranura (32) en una pluralidad de posiciones.

10

5. Carro alimentador según la reivindicación 1, caracterizado por que está constituido por dos placas laterales (38), una placa delantera (40) móvil y una placa trasera (42) móvil, mediante lo cual se permite variar la geometría del carro alimentador desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga.

15

6. Carro alimentador según la reivindicación 5, caracterizado por que las placas laterales (38) presentan una ranura superior (44) y una ranura inferior (46), las placas delantera y trasera (40, 42) presentan un orificio roscado de fijación inferior (48) y una pluralidad de orificios roscados de fijación superiores (50) para fijar dichas placas delantera (40) y trasera (42) a las placas laterales (38) en una pluralidad de posiciones mediante tornillería (52) a través de las ranuras inferiores (46) y superiores (44), respectivamente, mediante lo cual se permite variar la geometría del carro alimentador desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga.

20

25

7. Carro alimentador según cualquiera de las reivindicaciones 5 ó 6, caracterizado por que comprende además un tubo interior (58) que recorre el carro alimentador desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga y destinado a contener en su interior el material particulado, presentando el tubo interior (58) una primera abrazadera (60) en su extremo superior y una segunda abrazadera (62) en su extremo inferior, presentando cada abrazadera (60, 62) al menos un orificio roscado para su fijación mediante tornillería a las placas laterales (38) a través de las ranuras superiores (44) e inferiores (46) en

30

35

- una pluralidad de posiciones.
8. Carro alimentador según la reivindicación 7, caracterizado por que cada una de las paredes laterales (38) comprende además una ranura intermedia (54) entre la ranura superior (44) y la ranura inferior (46), y el tubo interior (58) comprende además una abrazadera intermedia (64) con al menos un orificio roscado de fijación para su fijación mediante tornillería a las placas laterales (38) través de las ranuras intermedias (54).
9. Carro alimentador según la reivindicación 1, caracterizado por que está constituido por un tubo (58), presentando dicho tubo (58) una primera abrazadera (60) en su extremo superior y una segunda abrazadera (62) en su extremo inferior mediante lo cual se proporcionan puntos de fijación que permiten variar la geometría del carro alimentador desde su extremo superior de llenado hasta su extremo inferior de descarga.
10. Carro alimentador según la reivindicación 9, caracterizado por que comprende una abrazadera intermedia (64) para proporcionar otro punto de fijación.
11. Uso de un carro alimentador para máquina compresora según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende las etapas de:
- determinar la geometría de carro óptima para un material particulado que se desea comprimir;
 - aplicar dicha geometría de carro óptima al carro alimentador;
 - llenar el carro alimentador con el material particulado; y
 - accionar la máquina compresora para fabricar los artículos comprimidos.
12. Uso según la reivindicación 11, caracterizado por que la etapa de determinar la geometría de carro óptima comprende:
- a) aplicar una primera geometría al carro alimentador;
 - b) fabricar artículos comprimidos con dicha primera geometría;
 - c) analizar la composición de los artículos comprimidos;
 - d) repetir las etapas a)-c) para una pluralidad de geometrías de carro distintas; y
 - e) determinar la geometría óptima para el material particulado empleado de entre la pluralidad de geometrías aplicadas al carro alimentador.
13. Uso según la reivindicación 11, caracterizado por que la etapa de determinar la geometría de carro óptima comprende:

- a) introducir parámetros que afectan a la segregación del material particulado en el carro alimentador en un software informático;
 - b) realizar simulaciones de segregación del material particulado con diversas geometrías del carro alimentador mediante dicho software informático; y
 - c) determinar la geometría óptima para el material particulado empleado de entre la pluralidad de geometrías simuladas para el carro alimentador.
- 5
14. Uso según la reivindicación 13, caracterizado por que los parámetros que afectan a la segregación del material particulado en el carro alimentador incluyen las dimensiones y la densidad del material particulado.
- 10
15. Uso según la reivindicación 14, caracterizado por que los parámetros que afectan a la segregación del material particulado en el carro alimentador incluyen además el coeficiente de restitución, el coeficiente de fricción estático y el coeficiente de fricción de rodadura entre las partículas del material particulado y entre el material particulado y el carro alimentador.
- 15

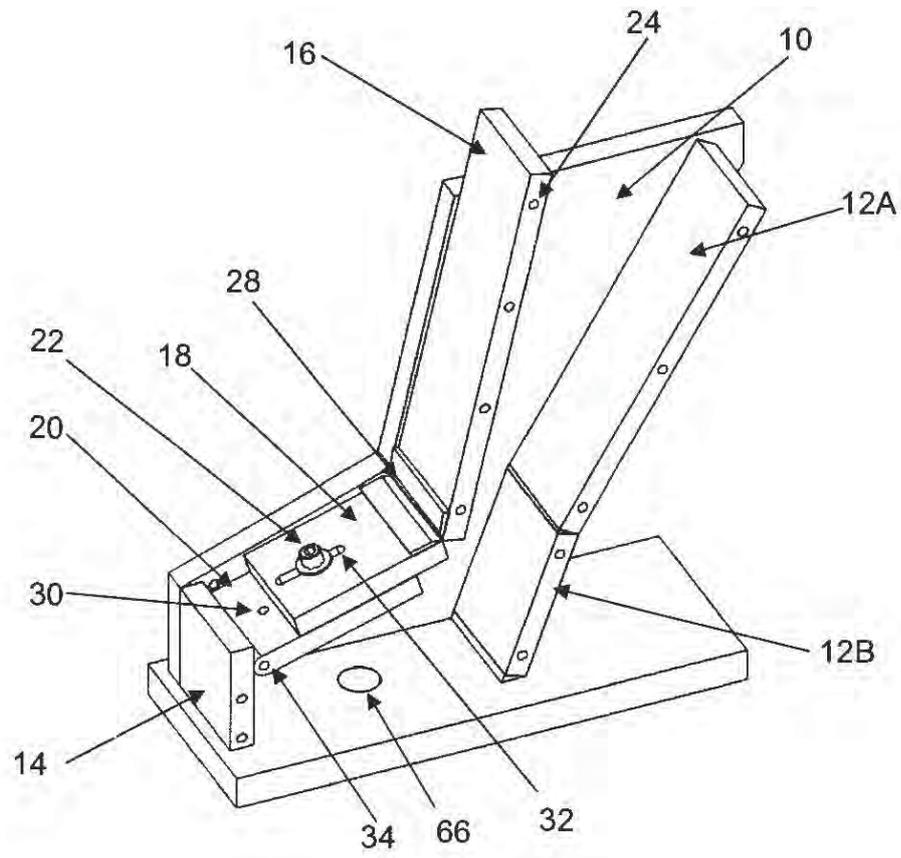


FIG. 1A

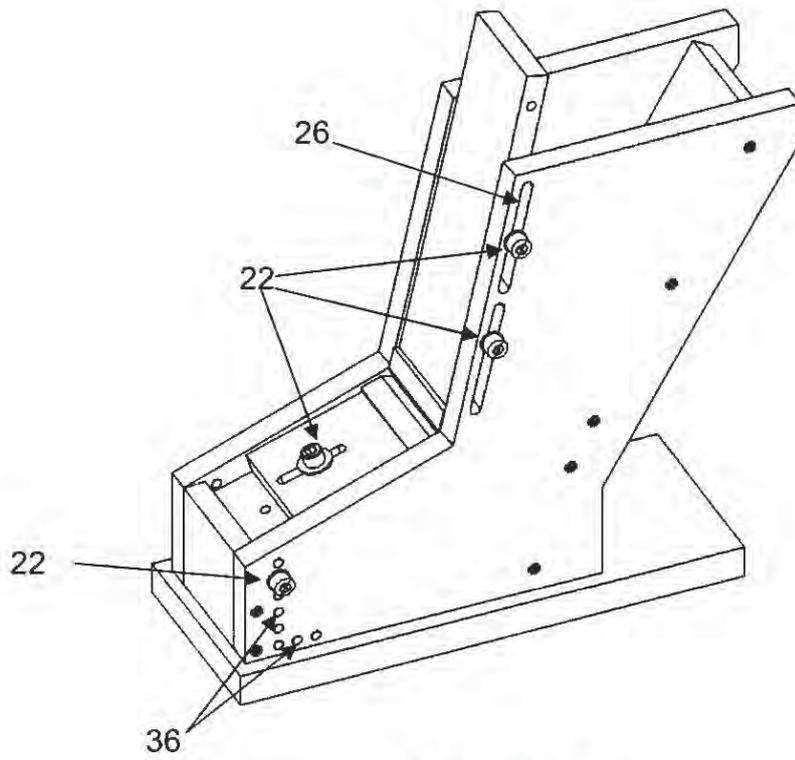


FIG. 1B

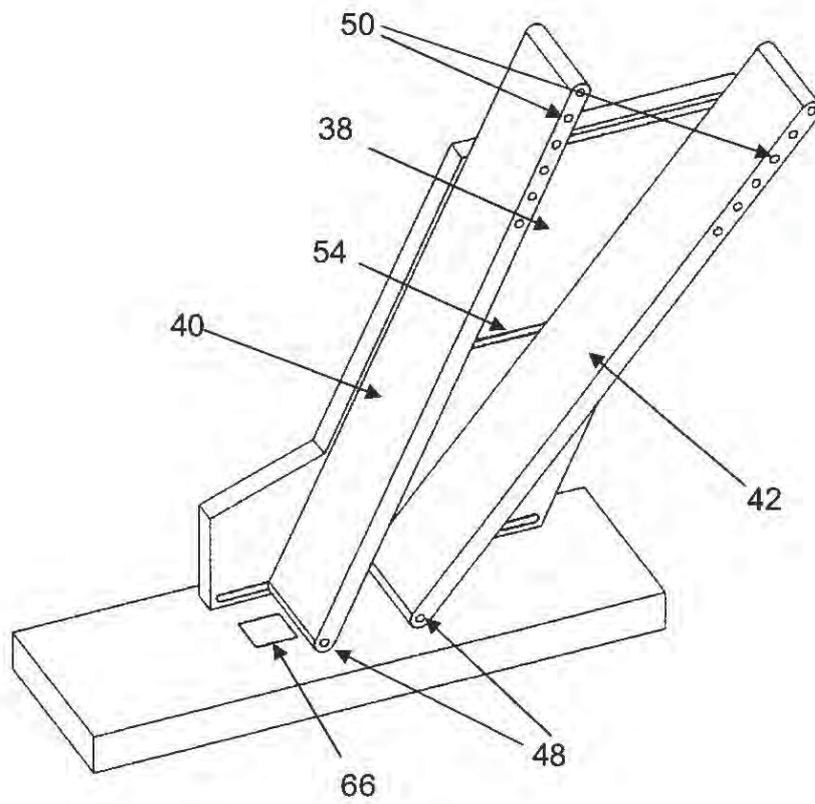


FIG. 2A

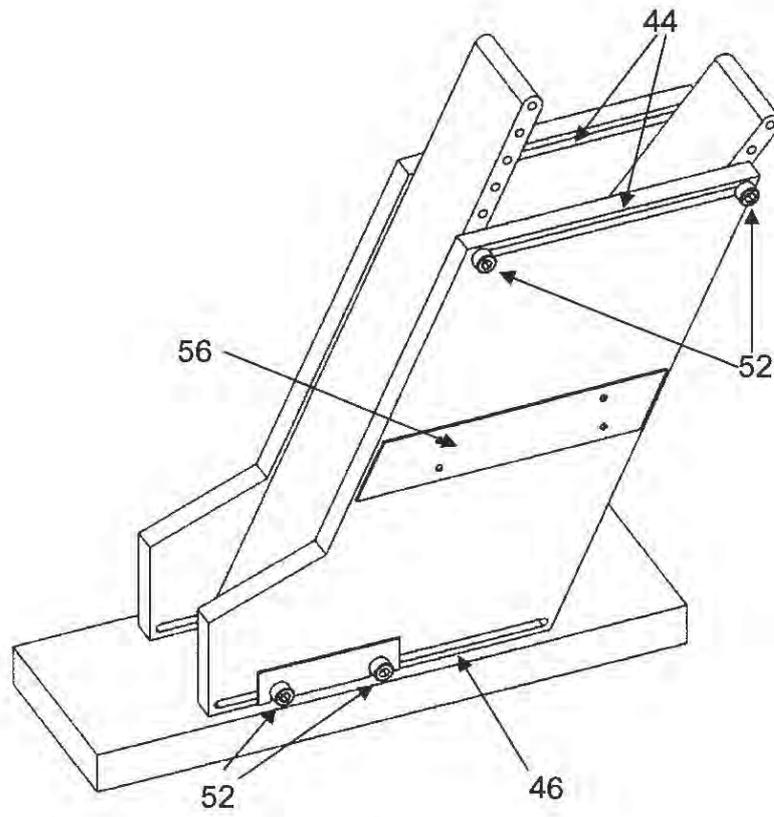


FIG. 2B

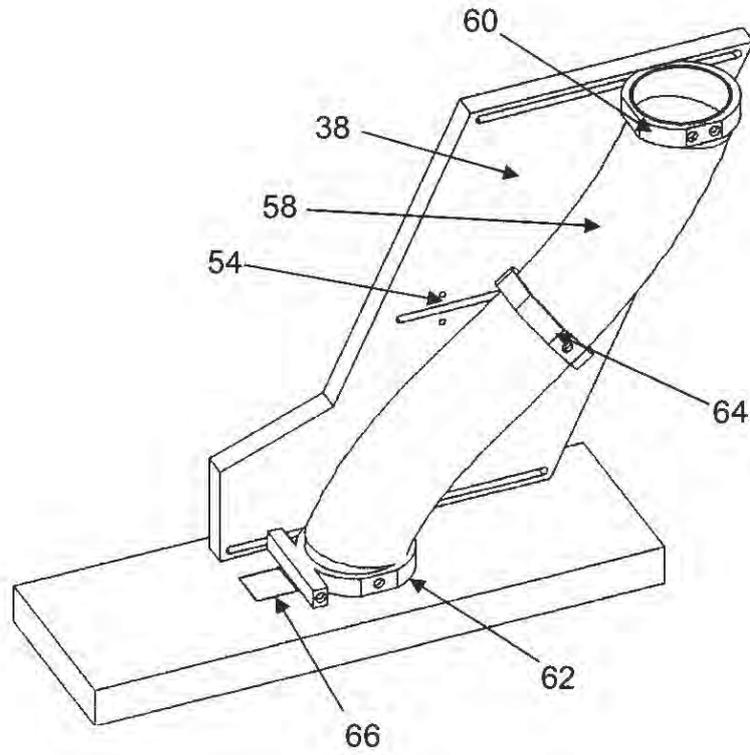


FIG. 3A

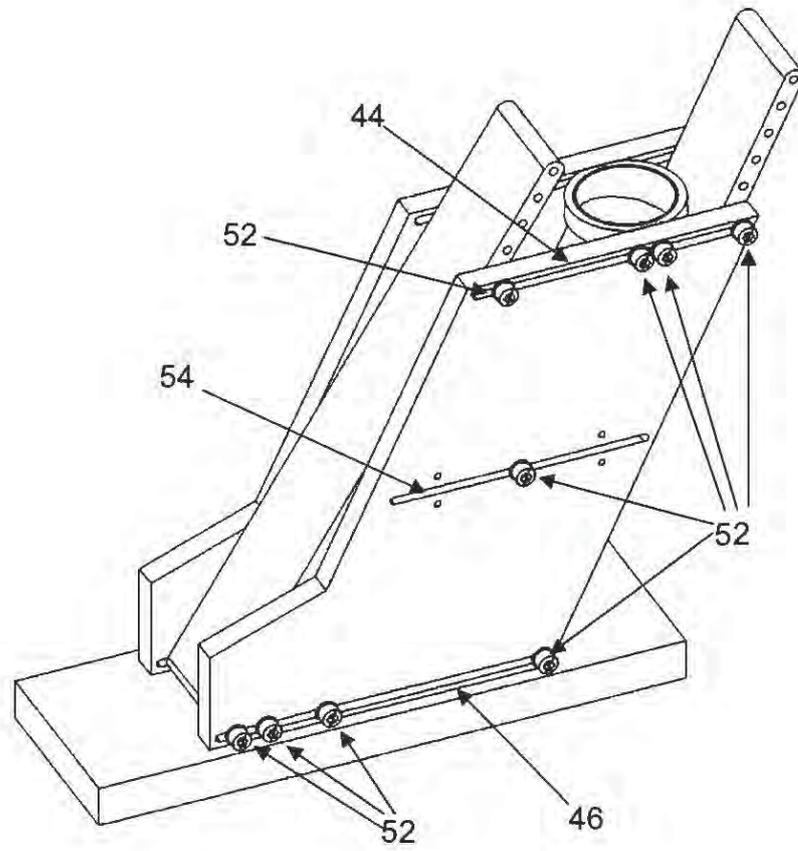


FIG. 3B

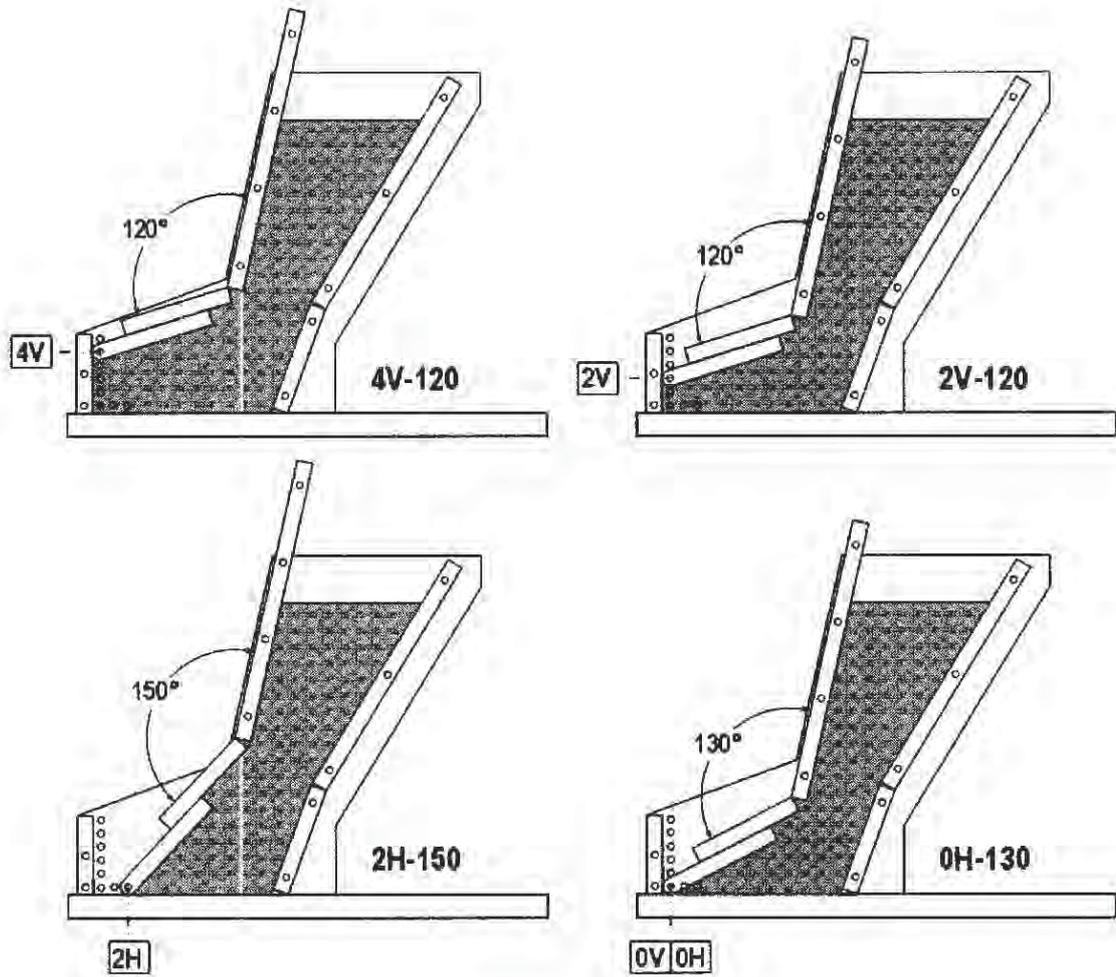


FIG. 4

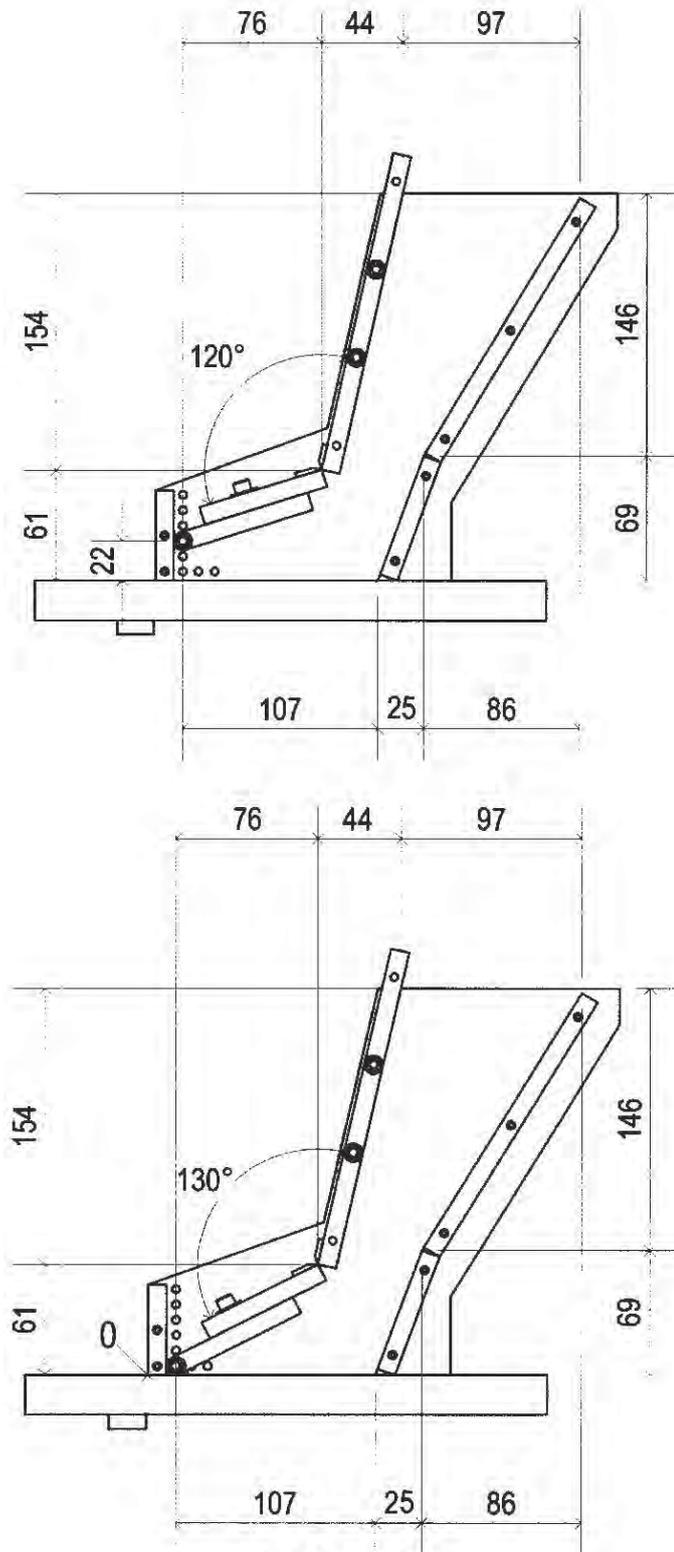


FIG. 5A

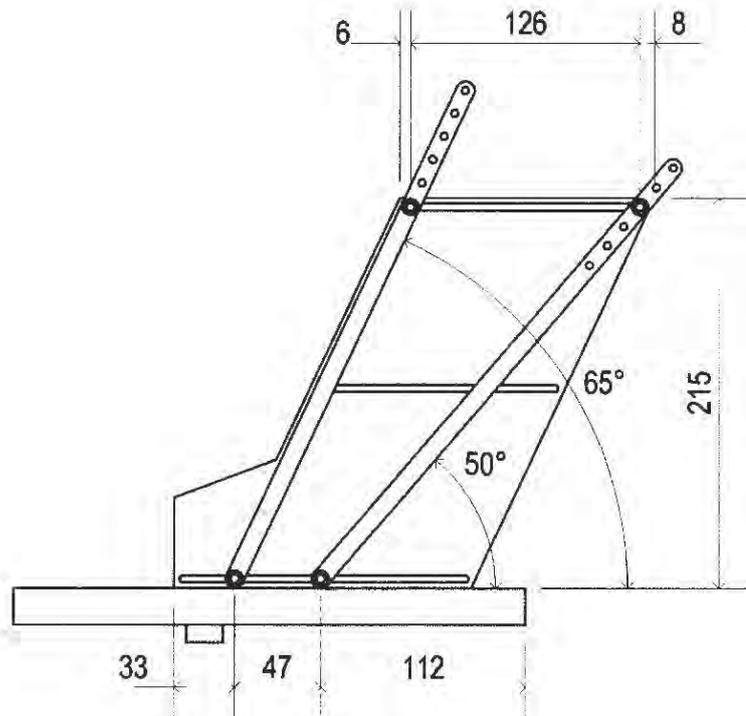
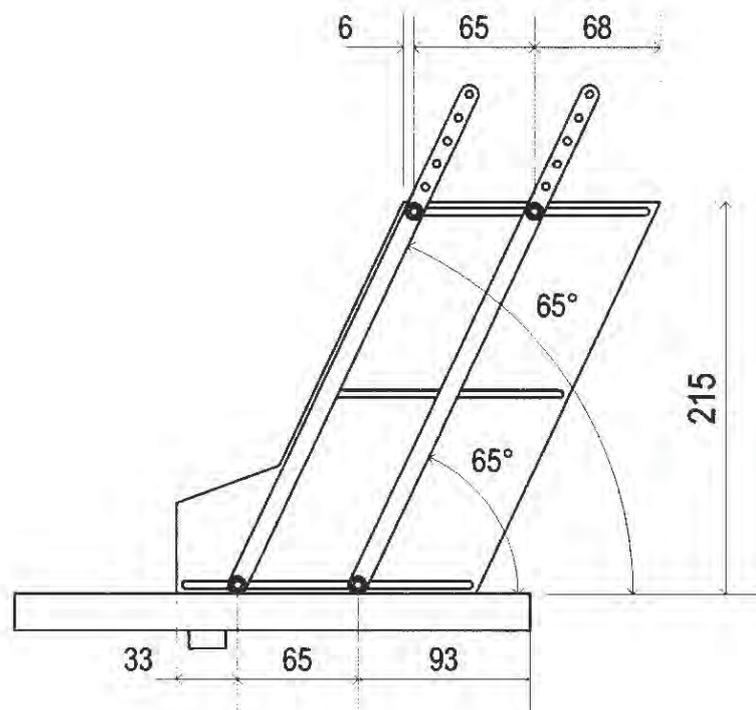


FIG. 5B

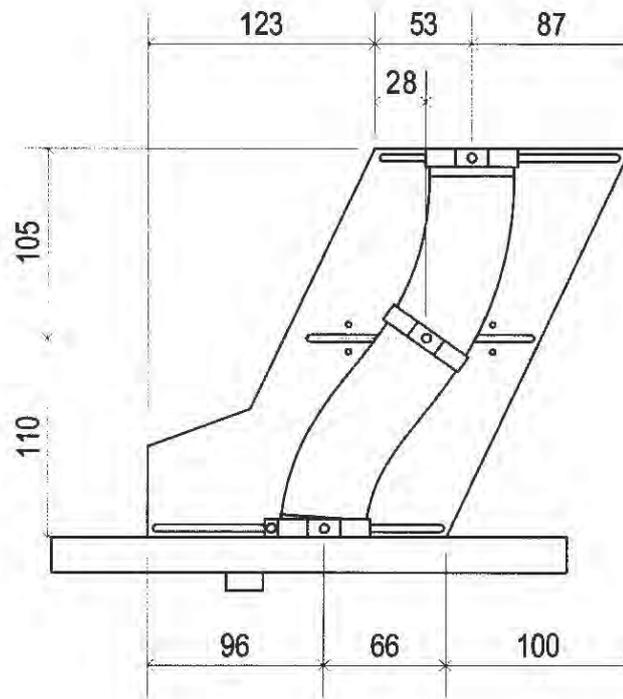
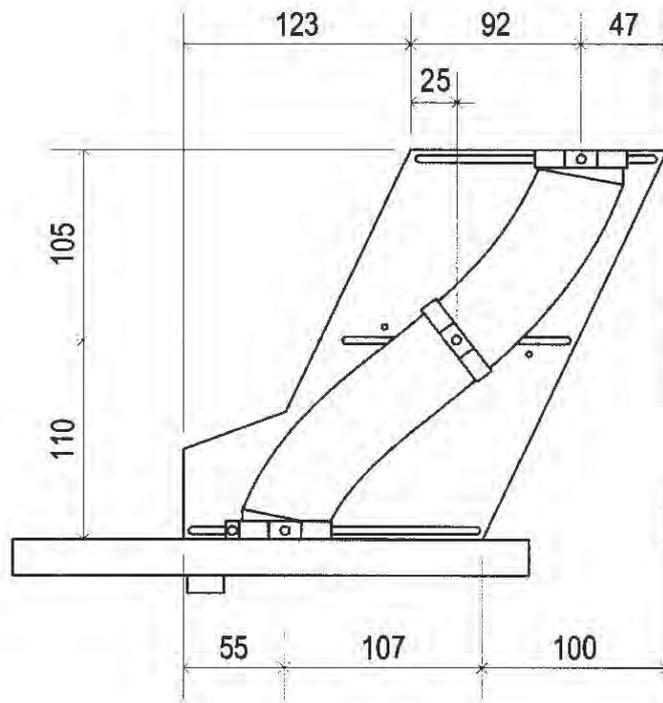


FIG. 5C



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 201300551

②② Fecha de presentación de la solicitud: 04.06.2013

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	EP 0262400 A1 (BREHM HANS) 06.04.1988, todo el documento.	1-15
A	WO 2005059477 A2 (MOVA PHARMACEUTICAL CORP et al.) 30.06.2005, todo el documento.	1-15
A	WO 8902866 A1 (MITSUI TOATSU CHEMICALS) 06.04.1989, todo el documento.	1-15

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
20.09.2013

Examinador
A. Pérez Igualador

Página
1/4

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

B28B13/02 (2006.01)

B30B15/30 (2006.01)

B65G47/18 (2006.01)

B65G47/44 (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

B65G

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 20.09.2013

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-15	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones 1-15	SI
	Reivindicaciones	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	EP 0262400 A1 (BREHM HANS)	06.04.1988

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

El documento D01, que se considera el más representativo del estado de la técnica, describe un sistema ajustable de control de la salida de un contenedor en forma de tolva. Mediante una tolva menor instalada dentro de la parte cónica final del contenedor se puede regular la cantidad de material granular que fluye de las partes central y periférica. Con esto se consigue regular el flujo de salida y reducir el fenómeno de la segregación.

El sistema de la solicitud se diferencia del sistema del documento D01 en que no regula el flujo mediante un elemento adicional, como hace D01, sino mediante la modificación de la geometría del carro desplazando los elementos *constituyentes* del mismo.

El objeto de las reivindicaciones de la solicitud es por lo tanto nuevo e implica actividad inventiva (Art. 4º, 6º y 8º de la Ley de Patentes 11/1986).

PATENTES

PATENTE EUROPEA

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)



(11) **EP 2 949 440 A1**

(12) **EUROPEAN PATENT APPLICATION**
published in accordance with Art. 153(4) EPC

(43) Date of publication:
02.12.2015 Bulletin 2015/49

(51) Int Cl.:
B28B 13/02 (2006.01) **B30B 15/30** (2006.01)
B65G 47/18 (2006.01) **B65G 47/44** (2006.01)

(21) Application number: **14807935.3**

(86) International application number:
PCT/ES2014/000086

(22) Date of filing: **21.05.2014**

(87) International publication number:
WO 2014/195536 (11.12.2014 Gazette 2014/50)

(84) Designated Contracting States:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Designated Extension States:
BA ME

(72) Inventors:
• **ALBA ELÍAS, Fernando**
E-26006 Logroño (ES)
• **MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Laura**
E-26006 Logroño (ES)
• **GONZÁLEZ MARCOS, Ana**
E-26006 Logroño (ES)
• **ORDIERES MERÉ, Joaquín**
E-28040 Madrid (ES)

(30) Priority: **04.06.2013 ES 201300551**

(74) Representative: **Maslanka, Dorota**
C/ Francisco de Quevedo, 2 - 5A
26006 Logroño (La Rioja) (ES)

(71) Applicants:
• **Universidad De La Rioja**
26006 Logroño (ES)
• **Universidad Politécnica de Madrid**
28040 Madrid (ES)

(54) **FEEDING CARRIAGE FOR COMPRESSOR MACHINE AND USE OF SAME**

(57) The invention relates to a feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced, and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold. At least some of the elements forming said feeding carriage can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the supply carriage located between both ends. The invention also relates to the use of such a feeding carriage comprising the initial steps of determining optimum carriage geometry for a particulate material which is to be compressed and applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage.

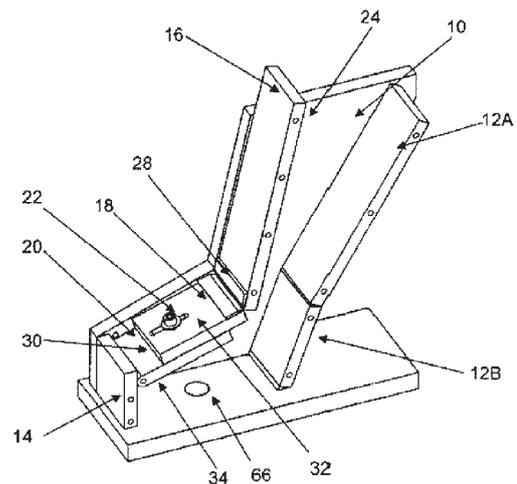


FIG. 1A

EP 2 949 440 A1

Description

FIELD OF THE INVENTION

5 **[0001]** The present invention generally relates to the field of compressor machines and more specifically to a feeding carriage for compressor machines.

PRIOR ART

10 **[0002]** Compressor machines are widely used in different technical fields, such as, for example, in pharmacy, in the preparation of vitamins, compacted mechanical parts, microelectronics, etc. Compressor machines are used together with a feeding carriage, providing a mold of the compressor machine with the starting particulate material in which said particulate material is compressed for producing the final compressed article.

15 **[0003]** Two main types of compressor machines are known: eccentric machines and rotary machines. Eccentric machines have a single mold, provided with one or more compression chambers and inserted in a part referred to as base plate. In such machines, the mold is fixed in place and the feeding carriage moves with a movement which allows filling the mold with particulate material, filling the mold completely, eliminating the remaining particulate material, and ejecting the final compressed article.

20 **[0004]** Rotary compressor machines in turn have several molds and punches inserted in a circular movable base plate. In this case, the feeding carriage is fixed in place.

25 **[0005]** When using compressor machines fed by means of a carriage or hopper, a phenomenon referred to as segregation occurs, causing non-homogenous filling of the mold of the compressor machine with particulate material. Obviously, this phenomenon is worsened when the particulate material is formed by a mixture of particles of different materials with different properties. This segregation phenomenon is particularly detrimental in applications in which it is important to maintain a specific proportion of the different materials used for manufacturing the final compressed article, such as in the pharmaceutical industry for tablet preparation.

30 **[0006]** Furthermore, other detrimental circumstances can also occur such as compaction problems derived from the fact that some particles remain stuck to the walls and others do not, the possibility of the pills breaking when printing numbers, logos, etc., thereon.

35 **[0007]** This segregation phenomenon, which consists of the clustering of similar particles, occurs by means of a combination of several mechanisms:

- a condensation mechanism that occurs due to the difference in density between different particles making up the particulate material: heavier particles tend to be located in the lower portion and lighter particles in the upper portion;
- 40 - a convection mechanism: this mechanism occurs in mixtures of particles having different sizes which, when subjected to certain vibration conditions, experience cyclic movement which causes them to accumulate in localized regions;
- segregation by percolation caused by small particles entering empty spaces generated by larger particles, in the direction of gravitational acceleration, until the granular structure tends to locally consist of the same particles; and
- a segregation trajectory through which the effects of friction reduce the speeds of smaller or more angular particles in a thin layer of moving material.

45 **[0008]** The combination of one or more of the preceding mechanisms therefore causes the segregation or separation of different particles making up a starting particulate material as it moves from the feeding carriage to the mold of the compressor machine.

50 **[0009]** A first segregation phenomenon can occur when filling the feeding carriage given that the particles fall at different speeds depending on their properties and also bounce off one another and the walls of the carriage in a different manner. Therefore, the properties of the particles (density, shape, size, etc.), the coefficients of friction (static and rolling) and the coefficient of restitution (in particle-particle and particle-carriage contacts), the carriage geometry, etc., affect this first segregation phenomenon.

55 **[0010]** The continuous filling of the mold/molds also causes a segregation phenomenon, given that the particles move within the carriage at different speeds due to the aforementioned factors.

[0011] In the case of eccentric compressor machines in which the feeding carriage is subjected to a continuous movement as mentioned above, this movement of the carriage causes an additional segregation of the particles present therein due to the previously mentioned factors.

[0012] As mentioned above, the feeding carriage geometry influences said segregation phenomena. However, it is not possible to design a feeding carriage with a universal optimum geometry which reduces segregation phenomena since said segregation also depends on other factors such as the properties and proportions of the different particles making up the particulate material, etc.

[0013] Patent document US 6764296 discloses a fluidizing method for fluidizing the content of a feeding carriage in order to reduce these segregation phenomena. The particulate materials are passed through a fluidizer which is partitioned by means of a distributor plate to form first and second chambers. The particulate materials pass through said first chamber which is in gaseous communication with said second chamber by means of the porous distributor plate. Gas is delivered to the second chamber at a pressure sufficient to generate a gas bearing between the porous distributor plate and the particulate material. The gas is allowed to migrate through the particulate material, and then be vented to the surrounding atmosphere without causing substantial turbulence in the particulate material.

[0014] However, homogenization of the particulate material is hard to control by means of the method disclosed in patent document US 6764296, and therefore it is not possible to assure that the final compressed articles will have the necessary weight and composition uniformity.

[0015] Therefore, there is still a need in the art for a feeding carriage which allows reducing segregation phenomena occurring when manufacturing compressed articles, thereby obtaining an improvement in weight and composition uniformity of said compressed articles.

DISCLOSURE OF THE INVENTION

[0016] The present invention solves the problems of the prior art by disclosing a feeding carriage for a compressor machine the geometry of which can be changed depending on the properties and proportions of the particles making up the starting particulate material, such that segregation phenomena occurring within said feeding carriage are minimized.

[0017] Specifically, according to a first aspect the present invention discloses a feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold. At least some of the elements forming the feeding carriage of the present invention can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the feeding carriage located between both ends. The term "move" must be interpreted in a broad sense, said term being able to refer to "modifying" the position of the elements of the carriage in order to modify the geometry thereof, "changing the diameter" of the carriage in order to modify the geometry thereof or "changing" the section of the carriage, among other equivalent concepts.

[0018] According to a second aspect, the present invention discloses use of a feeding carriage for a compressor machine according to the first aspect of the present invention. The use according to the second aspect of the present invention comprises the steps of:

- determining optimum carriage geometry for a particulate material to be compressed;
- applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage;
- filling the feeding carriage with the particulate material; and
- operating the compressor machine to manufacture the compressed articles.

[0019] As will be described below in the present document, optimum carriage geometry can be determined by means of empirical tests or by means of computer simulation.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0020] The present invention will be better understood in reference to the following drawings illustrating preferred embodiments of the invention which are provided by way of example and must not be interpreted as limiting of the invention.

Figures 1A and 1B show perspective views of a feeding carriage according to a first preferred embodiment of the present invention.

Figures 2A and 2B show perspective views of a feeding carriage according to a second preferred embodiment of the present invention.

Figures 3A and 3B show perspective views of a feeding carriage according to a third preferred embodiment of the present invention.

Figure 4 shows side section views of a feeding carriage according to the first preferred embodiment of the invention in four different geometric configurations.

Figure 5A shows side section views of a feeding carriage according to the first preferred embodiment of the invention in two different geometric configurations.

5 Figure 5B shows side section views of a feeding carriage according to the second preferred embodiment of the invention in two different geometric configurations.

Figure 5C shows side section views of a feeding carriage according to the third preferred embodiment of the invention in two different geometric configurations.

10 DETAILED DISCLOSURE OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

[0021] As it is used throughout the present document and in the attached claims, the term "compressor machines" refers to machines used in any technical field for the preparation of compressed articles (pharmaceutical tablets, vitamins, parts for microelectronics, compacted structural parts, etc.) which can be fed with particulate material from a feeding carriage.

[0022] As it is used throughout the present document and in the attached claims, the term "particulate material" refers to any type of material used for the preparation of articles compressed by means of compressor machines, regardless of the size and shape (cylindrical, spherical, etc.) thereof.

[0023] Figures 1A and 1B show a feeding carriage according to a first preferred embodiment of the present invention. This feeding carriage is formed by two side plates (10), two rear plates (12A, 12B) and a fixed lower front plate (14). These elements will remain fixed firmly in place for all the configurable feeding carriage geometries. The rear plates (12A, 12B) and the fixed lower front plate (14) are attached to the side plates (10) in a conventional manner by means of nuts and bolts. However, the person skilled in the art will understand that other attachment means such as welding, adhesives, etc., can be used.

[0024] In order to change its geometry, the feeding carriage further comprises a movable upper front plate (16), a first sliding front plate (18) and a second sliding front plate (20).

[0025] The upper front plate (16) can be fixed to both side plates (10) by means of nuts and bolts (22) in a plurality of positions. To that end, as can be seen in Figure 1A, the upper front plate (16) has a plurality of threaded holes (24). In turn, as seen in Figure 1B, the side plates (10) have a pair of grooves (26). The nuts and bolts are introduced through the grooves (26) into the threaded holes (24) for fixing the upper front plate (16) to the side plates (10) in the desired position.

[0026] The first sliding front plate (18) is in turn attached to the upper front plate (16) by means of a hinge (28) which allows changing the angle of inclination formed between both, thereby providing one more degree of freedom for changing the feeding carriage geometry.

[0027] The first sliding front plate (18) is attached to the second sliding front plate (20) by means of nuts and bolts (22) through a threaded hole (30) present in the second sliding front plate (20) and a groove (32) present in the first sliding front plate (18), said groove (32) allowing relative sliding of one sliding front plate with respect to the other. According to the preferred embodiment, the second sliding front plate (20) has a plurality of threaded holes (30), such that the first sliding front plate (18) and the second sliding front plate (20) can be fixed to one another in a plurality of positions by means of nuts and bolts (22) through the groove (32) and any one of the plurality of threaded holes (30).

[0028] Finally, the second sliding front plate (20) can be fixed to both side plates (10) by means of nuts and bolts (22) in a plurality of positions. To that end, the second sliding front plate (20) has a threaded hole (34) arranged to coincide with one of the plurality of holes (36) present in the side plates (10). Therefore, as will be described below in the present document, depending on which of the plurality of holes (36) of the side plates (10) in which the threaded hole (34) of the second sliding front plate (20) is fixed, the feeding carriage will have a different geometry that will influence segregation phenomena experienced by the particulate material therein.

[0029] According to the embodiment shown in Figures 1A and 1B, the second sliding front plate (20) can be fixed to the side plates (10) in eight different geometric configurations, whereby providing a wide choice for the feeding carriage geometry in order to reduce segregation phenomena occurring to the minimum. Obviously, the person skilled in the art will understand that this embodiment is not limiting and that other feeding carriages according to the present invention with a greater or smaller number of possible geometric configurations can be designed.

[0030] The attached Figures 2A and 2B show a second preferred embodiment of the feeding carriage of the present invention. According to this second embodiment, the feeding carriage is formed by two side plates (38), a front plate (40) and a rear plate (42). Each side plate (38) has an upper groove (44) and a lower groove (46). The front plate (40) and the rear plate (42) each have a lower threaded fixing hole (48) and a plurality of upper threaded fixing holes (50) for fixing said front plate (40) and rear plate (42) to the side plates (38) in a plurality of positions by means of nuts and bolts (52) through the lower grooves (46) and upper grooves (44), respectively.

[0031] The feeding carriage according to this second preferred embodiment of the invention therefore allows changing

the entire carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end.

[0032] As can be seen in Figure 2A, the side walls (38) also comprise an intermediate groove (54) the function of which is to adapt the feeding carriage for use according to a third preferred embodiment of the present invention described below in the present document. Given that said intermediate groove (54) is not of use according to this second preferred embodiment of the present invention, it is covered with a cover (56) to prevent the particulate material from leaking out through said intermediate groove (54).

[0033] Figures 3A and 3B show a third preferred embodiment of the feeding carriage of the present invention. In this case, the composition of the feeding carriage is substantially similar to that of the feeding carriage according to the second preferred embodiment of the present invention described above, with the difference that it further comprises an inner tube (58) which runs along the feeding carriage from its upper filling end to its lower discharging end. The inner tube (58) is intended for containing therein the particulate material. The inner tube (58) has a first clamp (60) at its upper end, a second clamp (62) at its lower end and an intermediate clamp (64). Each clamp (60, 62, 64) comprises at least one threaded hole for fixing same by means of nuts and bolts to the side plates (38) through the upper grooves (44), lower grooves (46) and intermediate grooves (54), respectively, in a plurality of positions.

[0034] According to another embodiment of the present invention, the feeding carriage is formed by a tube (58), preferably made of a flexible material which allows bending but is rigid enough to maintain the fixed position. Said tube (58) has fixing means which allow changing the entire feeding carriage geometry. Said fixing means can be a first clamp (60) at its upper end and a second clamp (62) at its lower end, although other equivalent fixing means are allowed, whereby fixing points which allow changing the entire feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end are provided. To fix the tube and to enable determining its geometry by means of the parameters indicated in the present specification, said tube can be fixed to a side plate (38) having an upper groove (44) and a lower groove (46), where the tube can be fixed by means of clamps (60, 62). The feeding carriage can comprise an intermediate clamp (64) for providing another fixing point.

[0035] The person skilled in the art will understand that the tube (58) can have a circular section, a square section or another suitable section type. At the same time, said section can remain constant or change along the path of the tube, as needed.

[0036] The feeding carriage according to the present invention (shown by way of example according to the preferred embodiments thereof) therefore allows changing the inner geometry thereof (either at its lower end or along the entire inner path of the feeding carriage) for the purpose of finding an optimum geometry which minimizes the segregation effects for each specific particulate material that is being used. Tablets that are uniform in weight and composition are thereby obtained when compressing the particulate material in a mold (66) of the compressor machine.

[0037] The present invention also discloses the use of a feeding carriage for a compressor machine such as any of those described above in the present document. Use according to the present invention comprises the steps of:

- determining optimum carriage geometry for a particulate material to be compressed;
- applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage;
- filling the feeding carriage with the particulate material; and
- operating the compressor machine to manufacture the compressed articles.

[0038] The step of determining optimum carriage geometry can be performed empirically carrying out a series of tests until attaining said optimum geometry, or by means of computer simulation. Specifically, according to a preferred embodiment of the present invention the step of determining optimum carriage geometry comprises:

- a) applying a first geometry to the feeding carriage;
- b) manufacturing compressed articles with said first geometry;
- c) analyzing the composition of the compressed articles;
- d) repeating steps a)-c) for a plurality of different carriage geometries; and
- e) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries applied to the feeding carriage.

[0039] According to a second preferred embodiment of the present invention, the step of determining optimum carriage geometry comprises:

- a) entering parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage in computer software;
- b) performing particulate material segregation simulations with different feeding carriage geometries by means of said computer software; and
- c) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries simulated for the feeding carriage.

[0040] The computer software preferably performs said simulation based on the discrete element method (DEM). DEM is used in the art for studying segregation phenomena. It is an effective method for addressing discontinuous and granular material engineering and is particularly useful for studying granular particle flows, powder mechanics and rock mechanics.

[0041] The parameters which affect particulate material segregation in the feeding carriage and must be entered in the computer software to allow performing said simulation include, for example, the dimensions and density of the particulate material, as well as preferably also the coefficient of restitution, the coefficient of static friction and the coefficient of rolling friction between the particles of the particulate material and between the particulate material and feeding carriage.

[0042] Two illustrative and non-limiting examples of determining optimum carriage geometry for a feeding carriage according to the present invention are described below.

Example 1

[0043] In this first example, mixtures with two components, C1 and C2, were studied. Component C1 consisted of cylinders 1.6 mm in diameter and 1.6 mm in height and with a density of 1104 kg/cm³. Component C2 consisted of cylinders 2.1 mm in diameter and 3.4 mm in height and with a density of 1021 kg/cm³. Three mixtures of these components C1/C2 at 75%/25%, 25%/75% and 50%/50% were studied.

[0044] Figure 4 shows the four carriage geometries studied for determining optimum geometry for each of those mixtures. Reciprocating movement of an actual feeding carriage was reproduced in terms of movements, times, speeds and accelerations in all the simulations. The studied geometries were:

4V-120: The second sliding front plate fixed to vertical hole 4 of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 120°.

2V-120: The second sliding front plate fixed to vertical hole 2 of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 120°.

2H-150: The second sliding front plate fixed to horizontal hole 2 of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 150°.

0H-130: The second sliding front plate fixed to hole 0 (corner hole) of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 130°.

[0045] The root-mean-square error (RMSE) corresponding, on one hand, to the first 50 tablets obtained and, on the other hand, to tablets 20-50 obtained in the so-called rated operating condition, was determined for each simulation. In fact, a first segregation phenomenon affecting approximately the first 20 tablets occurs when filling the non-operating feeding carriage. Tablets 20-50 are only affected by the actual segregation of the reciprocating movement of the feeding carriage.

[0046] Table 1 below shows the RMSE between the theoretical percentage of the reference component and the actual percentage of said reference component in the first 50 tablets. The RMSE therefore shows the degree of segregation occurring in the process, such that the lower the RMSE, the less the segregation that took place. Therefore, the values in bold indicate optimum carriage geometry.

Table 1

Percentage of components	Configuration				Reference component (theoretical percentage)
	4V-120	2V-120	2H-150	0H-130	
C1/C2					
75/25	6.40	3.97	4.02	3.49	C2 (25%)
25/75	6.02	3.68	4.26	3.78	C1 (25%)
50/50	7.87	4.88	4.50	4.85	C1/C2 (50%)

[0047] Table 2 below shows the RMSE between the theoretical percentage of the reference component and the actual percentage of said reference component of tablet 20 to tablet 50. The values in bold indicate optimum carriage geometry.

EP 2 949 440 A1

Table 2

Percentage of components	Configuration				Reference component (theoretical percentage)
	4V-120	2V-120	2H-150	0H-130	
C1/C2	4.34	2.38	3.36	2.15	C2 (25%)
75/25	3.17	2.02	3.87	1.88	C1 (25%)
25/75	5.03	2.37	4.26	2.53	C1/C2 (50%)

[0048] As can be seen from the preceding tables, optimum carriage configuration changes with the proportion of the different particles making up the particulate material used as raw material. Therefore, there is a proven need for a carriage having a variable geometry such as the one disclosed in a novel manner by the present invention which is adaptable and can provide optimum configuration for each composition of different particulate material used as raw material.

Example 2

[0049] Simulations similar to those in Example 1 were performed by means of the discrete element method. In this case, the particles making up the particulate material were:

Component C1: Spheres 2 mm in diameter and with a density of 1150 kg/cm³.

Component C2: Spheres 4 mm in diameter and with a density of 1150 kg/cm³.

[0050] In this case, other additional parameters also affecting segregation phenomena occurring inside the feeding carriage were also taken into account in the computer simulation. These parameters are summarized in Table 3 below:

Table 3

		C1	C2
Coefficient of restitution	Particle-carriage	0.2	0.2
	Particle-particle	0.7	0.7
Coefficient of static friction	Particle-carriage	0.5	0.5
	Particle-particle	0.5	0.5
Coefficient of rolling friction	Particle-carriage	0	0
	Particle-particle	0.5	0.5

[0051] Three different proportions of components C1/C2 at 15%/85%, 85%/15% and 50%/50% were studied in two different geometries of each of the three preferred embodiments of the feeding carriage of the present invention described above in the present document (Figures 1A, 1 B; 2A, 2B; and 3A, 3B, respectively).

[0052] The attached Figures 5A, 5B and 5C each show the two studied feeding carriage configurations according to several preferred embodiments of the present invention. The dimensions included in said drawings constitute the exact geometric arrangements under study.

[0053] Tables 4, 5 and 6 below show the RMSE results obtained for each of the configurations studied for each of the feeding carriage configurations. Once again, values in bold indicate optimum carriage geometry for each case.

Table 4: First embodiment of the feeding carriage

Percentage of components	Configuration		Reference component (theoretical percentage)
	A	B	
C1/C2	A	B	
15/85	5.822	6.293	C1 (15%)
85/15	6.401	5.433	C2 (15%)
50/50	8.818	7.024	C1 (50%)

Table 5: Second embodiment of the feeding carriage

Percentage of components	Configuration		Reference component (theoretical percentage)
	A	B	
C1/C2	A	B	
15/85	7.718	4.178	C1 (15%)
85/15	6.648	8.586	C2 (15%)
50/50	6.138	7.626	C1 (50%)

Table 6: Third embodiment of the feeding carriage

Percentage of components	Configuration		Reference component (theoretical percentage)
	A	B	
C1/C2	A	B	
15/85	2.471	3.911	C1 (15%)
85/15	5.293	5.277	C2 (15%)
50/50	4.339	6.022	C1 (50%)

[0054] Although the present invention has been described in reference to several preferred embodiments thereof, the person skilled in the art will understand that modifications and variations can be applied thereto without departing from the essence and scope of the present invention.

[0055] For example, although several embodiments of feeding carriages for compressor machines the geometry of which can be changed according to several configurations have been described, it must be understood that the invention is not limited to said embodiments and generally relates to a feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold, provided that at least some of the elements forming said feeding carriage can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the feeding carriage located between both ends. In practice, being able to define all the geometric parameters of the carriage which can have different shape variations (regardless of its shape, it is possible to determine/calculate its geometry) and being able to define the different parameters of the actual mixture to be compressed and other mechanical parameters of the process enable determining said optimum carriage geometry by means of software or by empirical means, which significantly reduces the segregation effect of the compressed material. Once the optimum geometry is determined, the carriage is suitably configured according to the determined data.

[0056] Likewise, although a feeding carriage according to the first preferred embodiment of the invention having two rear plates has been described, it must be understood that additional embodiments of said feeding carriage can have a single rear plate, or more than two rear plates, without departing from the scope of the invention.

[0057] Similarly, although a feeding carriage according to the third preferred embodiment of the invention having an intermediate groove and an intermediate clamp has been described, it must be understood that other embodiments of the feeding carriage may lack said intermediate groove and intermediate clamp.

[0058] The different elements forming the feeding carriage of the present invention can be any suitable material commonly used in the art, such as steel, for example. In the case of comprising an inner tube, it can be manufactured from any suitable material, such as polyethylene, PVC, steel, etc.

[0059] The feeding carriage of the present invention can have number markings, angle markings, etc., to help the user configure the different possible geometries thereof.

[0060] The feeding carriage of the present invention can be applied to any suitable type of compressor machine, be it an eccentric machine or a rotary machine.

Claims

1. A feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold, **characterized in that** at least some of the elements

forming said feeding carriage can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the feeding carriage located between both ends.

5 2. The feeding carriage according to claim 1, **characterized in that** it is formed by two side plates (10), at least one rear plate (12A, 12B), a fixed lower front plate (14), a movable upper front plate (16), a first sliding front plate (18) and a second sliding front plate (20) which allow changing the feeding carriage geometry.

10 3. The feeding carriage according to claim 2, **characterized in that:**

- the upper front plate (16) can be fixed to each side plate (10) in a plurality of positions by means of nuts and bolts (22) through a plurality of threaded holes (24) in the upper front plate (16) and a plurality of corresponding grooves (26) in each side plate (10);

15 - the first sliding front plate (18) is attached to the upper front plate (16) by means of a hinge (28) which allows changing the angle of inclination formed between both;

- the first sliding front plate (18) is attached to the second sliding front plate (20) by means of nuts and bolts (22) through a threaded hole (30) present in one of the first or second sliding front plates and a groove (32) present in the other one of the second or first sliding front plates, said groove (32) allowing relative sliding of one sliding front plate with respect to the other;

20 - the second sliding front plate (20) can be fixed to each side plate (10) in a plurality of positions by means of nuts and bolts (22) through a threaded hole (34) in the second sliding front plate (20) and one of a plurality of holes (36) in each side plate (10);

25 whereby the different possible fixing positions of the upper front plate (16), the first sliding front plate (18) and the second sliding front plate (20) allow changing the geometry of the lower discharging end of the feeding carriage.

30 4. The feeding carriage according to any of claims 2 or 3, **characterized in that** the first sliding front plate (18) has a groove (32) and the second sliding front plate (20) has a plurality of threaded holes (30) allowing the fixing of the first sliding front plate (18) and the second sliding front plate (20) by means of nuts and bolts (22) through any one of said plurality of threaded holes (30) and the groove (32) in a plurality of positions.

35 5. The feeding carriage according to claim 1, **characterized in that** it is formed by two side plates (38), a movable front plate (40) and a movable rear plate (42), whereby it allows changing the feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end.

40 6. The feeding carriage according to claim 5, **characterized in that** the side plates (38) have an upper groove (44) and a lower groove (46), the front and rear plates (40, 42) have a lower threaded fixing hole (48) and a plurality of upper threaded fixing holes (50) for fixing said front plate (40) and rear plate (42) to the side plates (38) in a plurality of positions by means of nuts and bolts (52) through the lower grooves (46) and upper grooves (44), respectively, whereby it allows changing the feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end.

45 7. The feeding carriage according to any of claims 5 or 6, **characterized in that** it further comprises an inner tube (58) running along the feeding carriage from its upper filling end to its lower discharging end and intended for containing therein the particulate material, the inner tube (58) having a first clamp (60) at its upper end and a second clamp (62) at its lower end, each clamp (60, 62) having at least one threaded hole for fixing thereof by means of nuts and bolts to the side plates (38) through the upper grooves (44) and lower grooves (46) in a plurality of positions.

50 8. The feeding carriage according to claim 7, **characterized in that** each of the side walls (38) further comprises an intermediate groove (54) between the upper groove (44) and the lower groove (46), and the inner tube (58) further comprises an intermediate clamp (64) with at least one threaded fixing hole for fixing thereof by means of nuts and bolts to the side plates (38) through the intermediate grooves (54).

55 9. The feeding carriage according to claim 1, **characterized in that** it is formed by a tube (58), said tube (58) having a first clamp (60) at its upper end and a second clamp (62) at its lower end whereby fixing points which allow changing the feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end are provided.

10. The feeding carriage according to claim 9, **characterized in that** it comprises an intermediate clamp (64) for providing another fixing point.

11. Use of a feeding carriage for a compressor machine according to any of the preceding claims, **characterized in that** it comprises the steps of:

- determining optimum carriage geometry for a particulate material to be compressed;
- applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage;
- filling the feeding carriage with the particulate material; and
- operating the compressor machine to manufacture the compressed articles.

12. Use according to claim 11, **characterized in that** the step of determining optimum carriage geometry comprises:

- a) applying a first geometry to the feeding carriage;
- b) manufacturing compressed articles with said first geometry;
- c) analyzing the composition of the compressed articles;
- d) repeating steps a)-c) for a plurality of different carriage geometries; and
- e) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries applied to the feeding carriage.

13. Use according to claim 11, **characterized in that** the step of determining optimum carriage geometry comprises:

- a) entering parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage in computer software;
- b) performing particulate material segregation simulations with different feeding carriage geometries by means of said computer software; and
- c) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries simulated for the feeding carriage.

14. Use according to claim 13, **characterized in that** the parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage include the dimensions and density of the particulate material.

15. Use according to claim 14, **characterized in that** the parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage furthermore include the coefficient of restitution, the coefficient of static friction and the coefficient of rolling friction between the particles of the particulate material and between the particulate material and the feeding carriage.

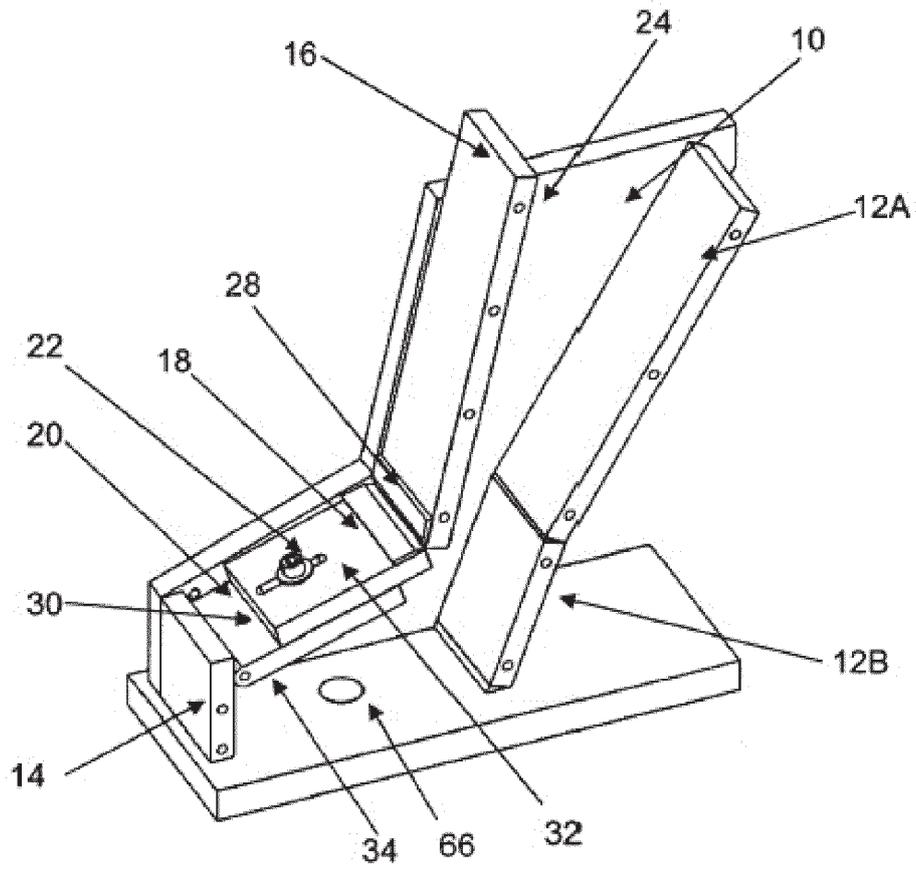


FIG. 1A

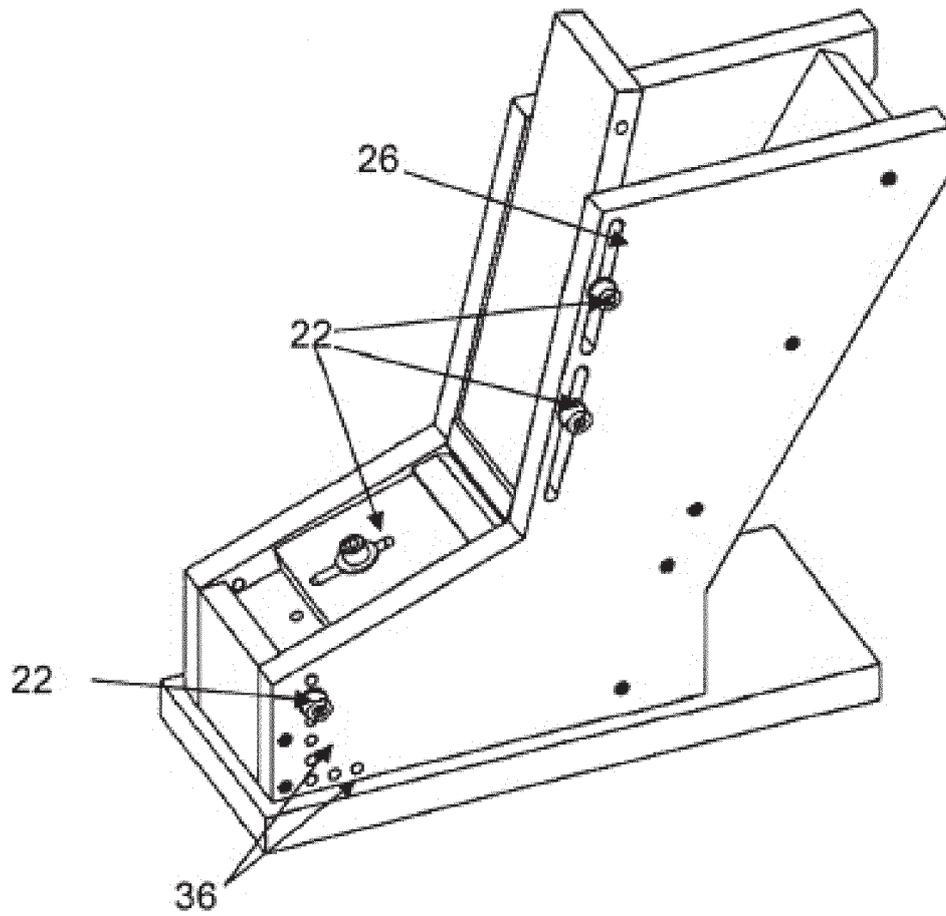


FIG. 1B

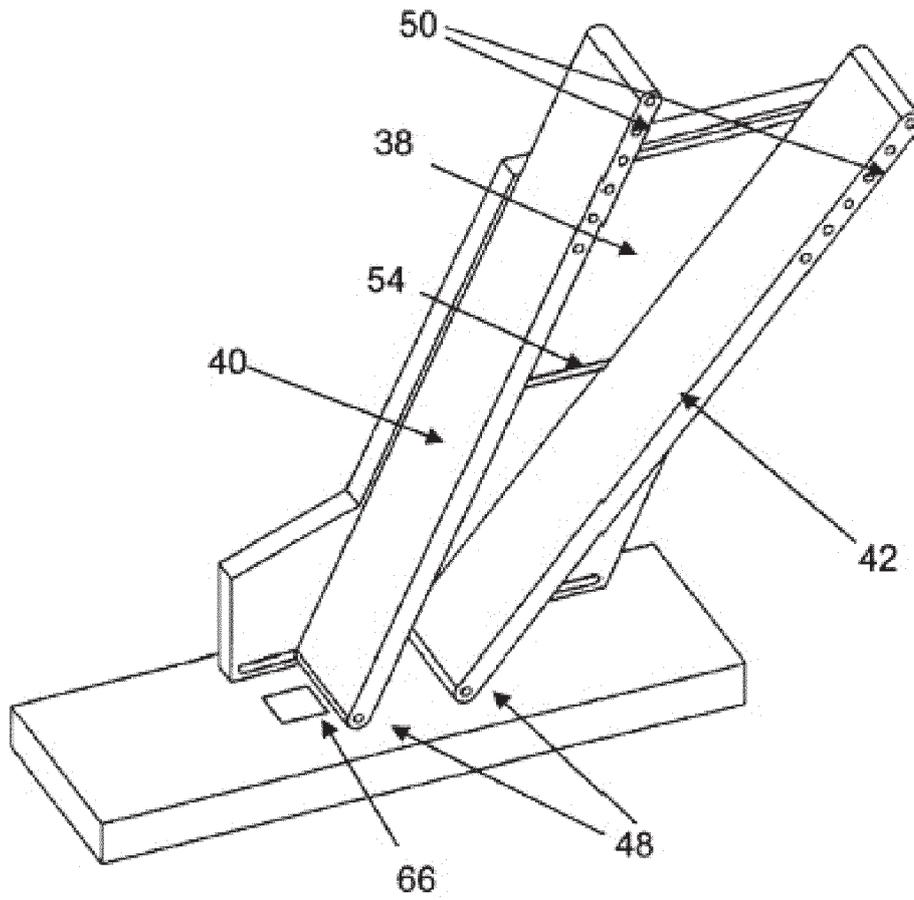


FIG. 2A

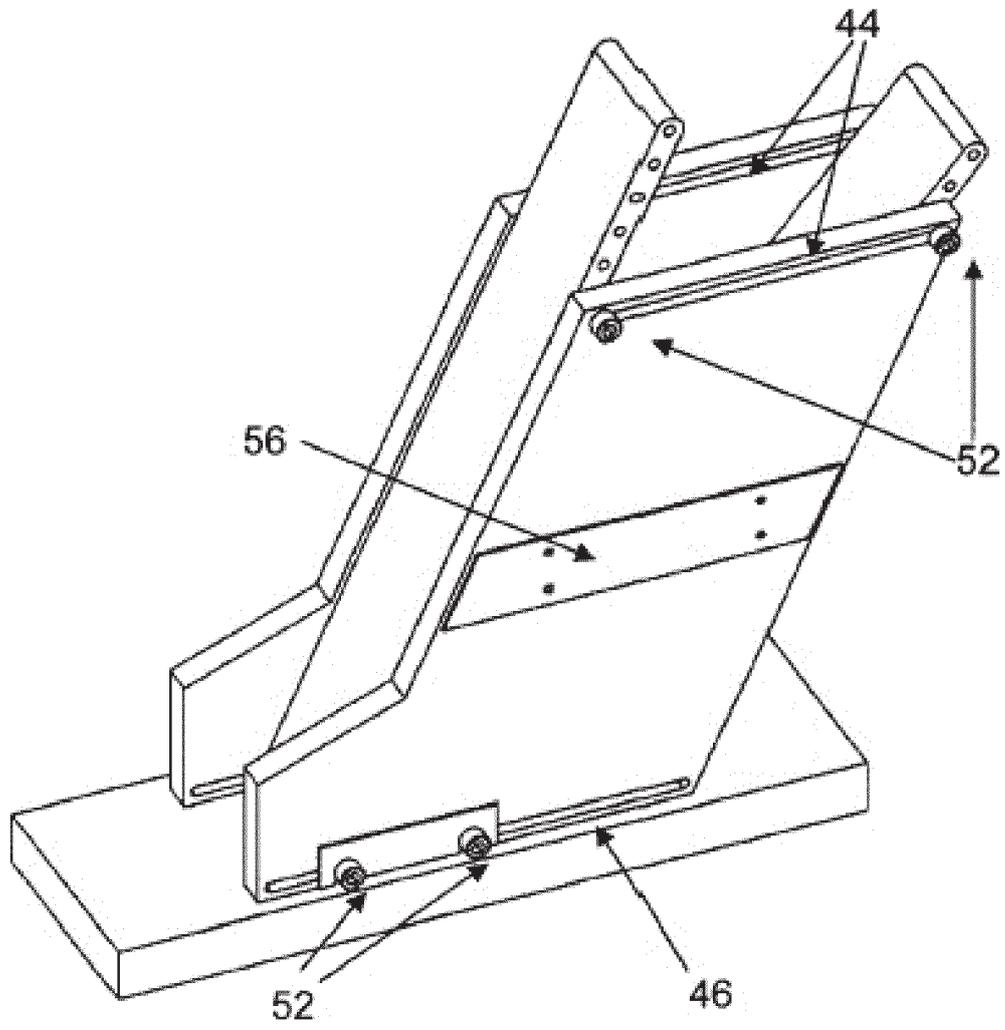


FIG. 2B

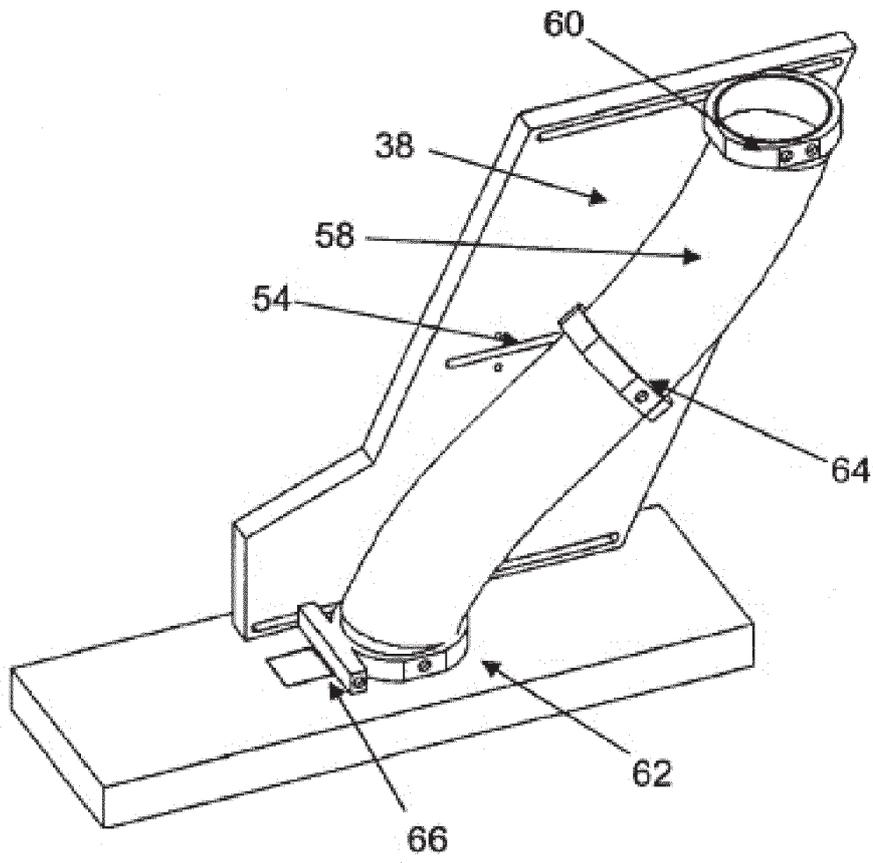


FIG. 3A

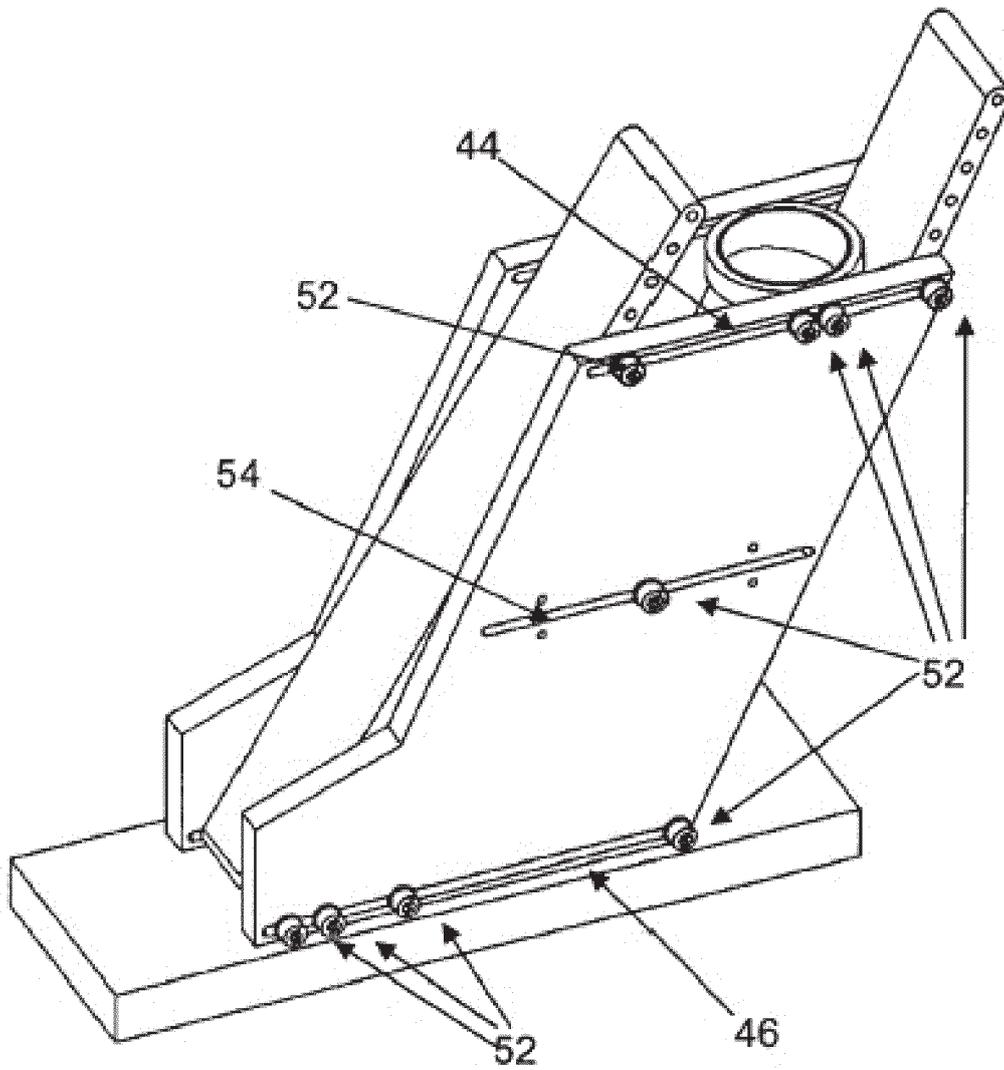


FIG. 3B

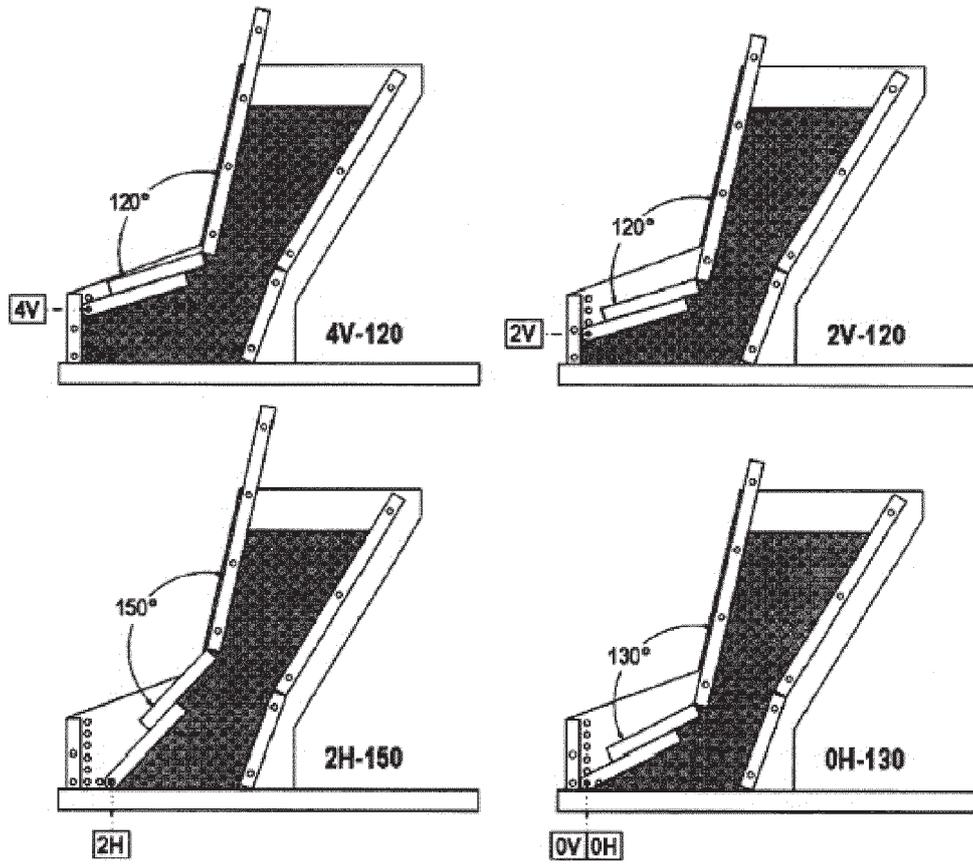


FIG. 4

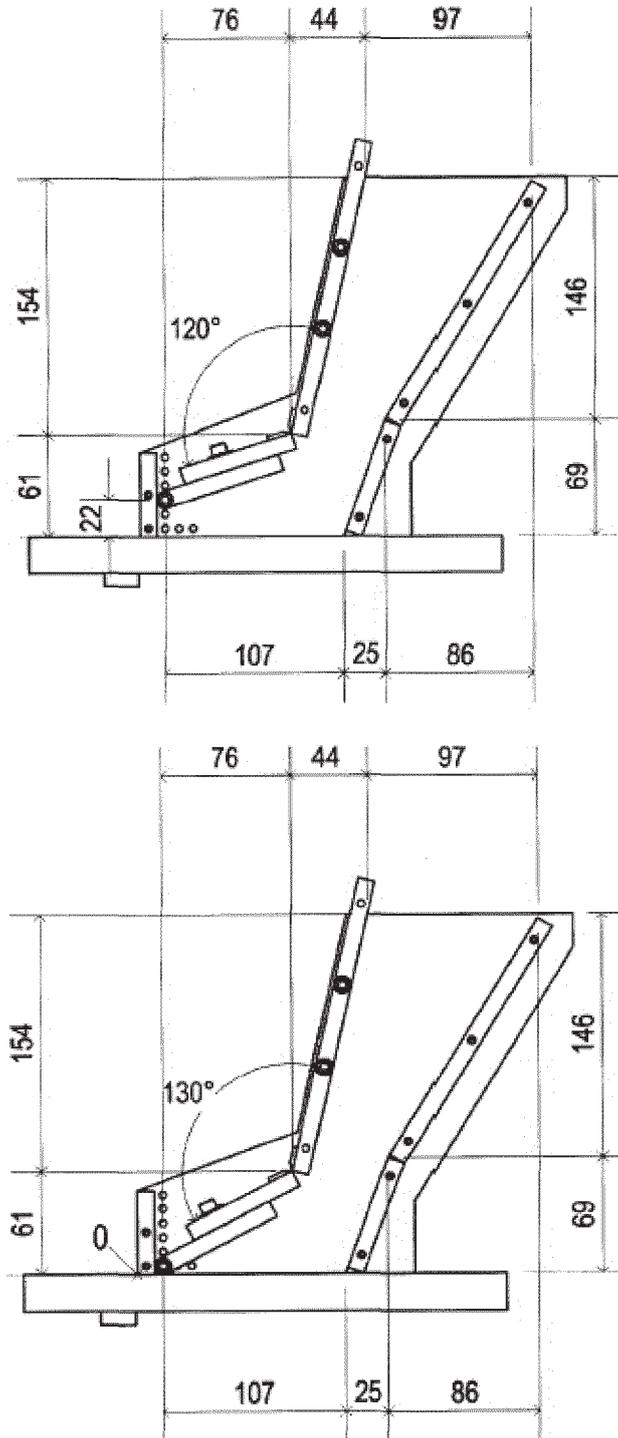


FIG. 5A

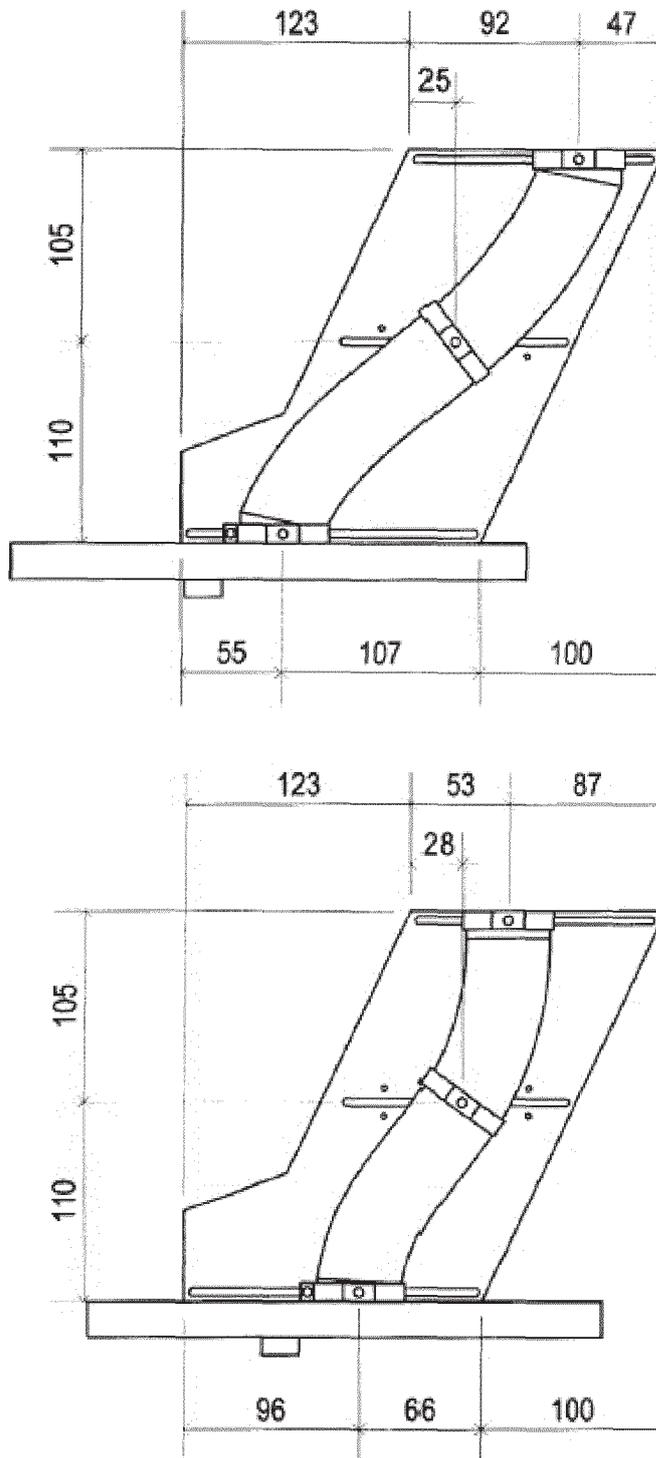


FIG. 5C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2014/000086

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
See extra sheet		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B28B, B30B, B65G		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPODOC, INVENES		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0262400 A1 (BREHM HANS) 06/04/1988, the whole the document.	1-15
A	WO 2005059477 A2 (MOVA PHARMACEUTICAL CORP ET AL.) 30/06/2005, the whole document.	1-15
A	WO 8902866 A1 (MITSUI TOATSU CHEMICALS) 06/04/1989, the whole document.	1-15
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance. "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means. "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 19/08/2014		Date of mailing of the international search report (28.08.2014)
Name and mailing address of the ISA/ OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España) Facsimile No.: 91 349 53 04		Authorized officer A. Pérez Igualador Telephone No. 91 3498489

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2014/000086

Information on patent family members

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP0262400 A1	06.04.1988	CH670439 A5	15.06.1989
-----	-----	-----	-----
WO2005059477 A2	30.06.2005	US2008259721 A1	23.10.2008
		EP1622820 A2	08.02.2006
		EP1622820 A4	10.05.2006
		AT490936T T	15.12.2010
-----	-----	-----	-----
WO8902866 A1	06.04.1989	NONE	
-----	-----	-----	-----

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2014/000086

5

CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B28B13/02 (2006.01)

B30B15/30 (2006.01)

B65G47/18 (2006.01)

B65G47/44 (2006.01)

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Form PCT/ISA/210 (extra sheet) (July 2009)

REFERENCES CITED IN THE DESCRIPTION

This list of references cited by the applicant is for the reader's convenience only. It does not form part of the European patent document. Even though great care has been taken in compiling the references, errors or omissions cannot be excluded and the EPO disclaims all liability in this regard.

Patent documents cited in the description

- US 6764296 B [0013] [0014]

PATENTES

PATENTE EEUU

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)



US 20160114549A1

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**
ELÍAS et al.

(10) **Pub. No.: US 2016/0114549 A1**

(43) **Pub. Date: Apr. 28, 2016**

(54) **FEEDING CARRIAGE FOR COMPRESSOR MACHINE AND USE OF SAME**

Publication Classification

(71) Applicants: **UNIVERSIDAD DE LA RIOJA**, Logrono (ES); **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**, Madrid (ES)

(51) **Int. Cl.**
B30B 15/30 (2006.01)
B29C 31/04 (2006.01)
B65G 11/10 (2006.01)
(52) **U.S. Cl.**
CPC *B30B 15/304* (2013.01); *B65G 11/106* (2013.01); *B29C 31/04* (2013.01)

(72) Inventors: **Fernando Alba ELÍAS**, Logrono (ES); **Laura Martínez MARTÍNEZ**, Logrono (ES); **Ana González MARCOS**, Logrono (ES); **Joaquín Ordieres MERÉ**, Madrid (ES)

(57) **ABSTRACT**

The invention relates to a feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced, and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold. At least some of the elements forming said feeding carriage can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the supply carriage located between both ends. The invention also relates to the use of such a feeding carriage comprising the initial steps of determining optimum carriage geometry for a particulate material which is to be compressed and applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage.

(21) Appl. No.: **14/892,313**

(22) PCT Filed: **May 21, 2014**

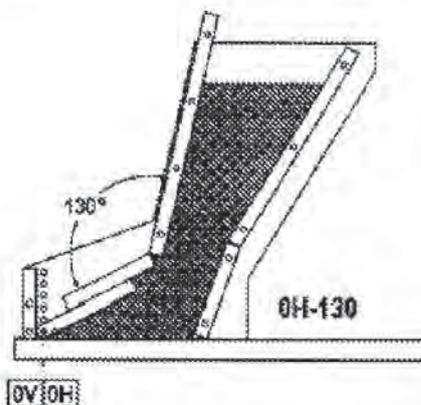
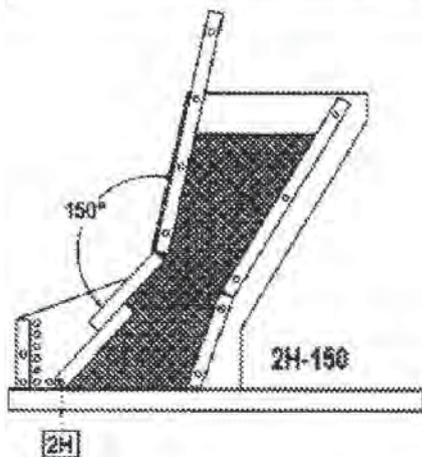
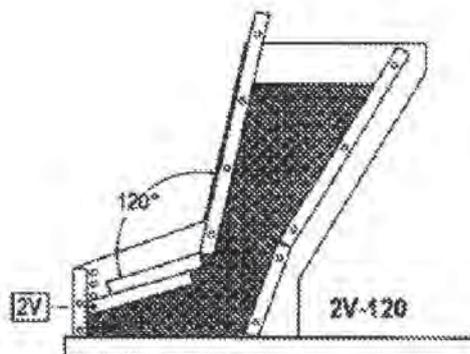
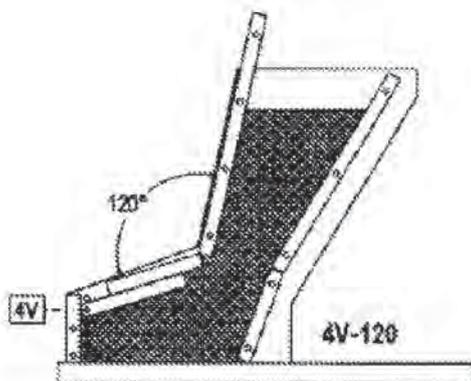
(86) PCT No.: **PCT/ES2014/000086**

§ 371 (c)(1),

(2) Date: **Nov. 19, 2015**

(30) **Foreign Application Priority Data**

Jun. 4, 2013 (ES) 201300551



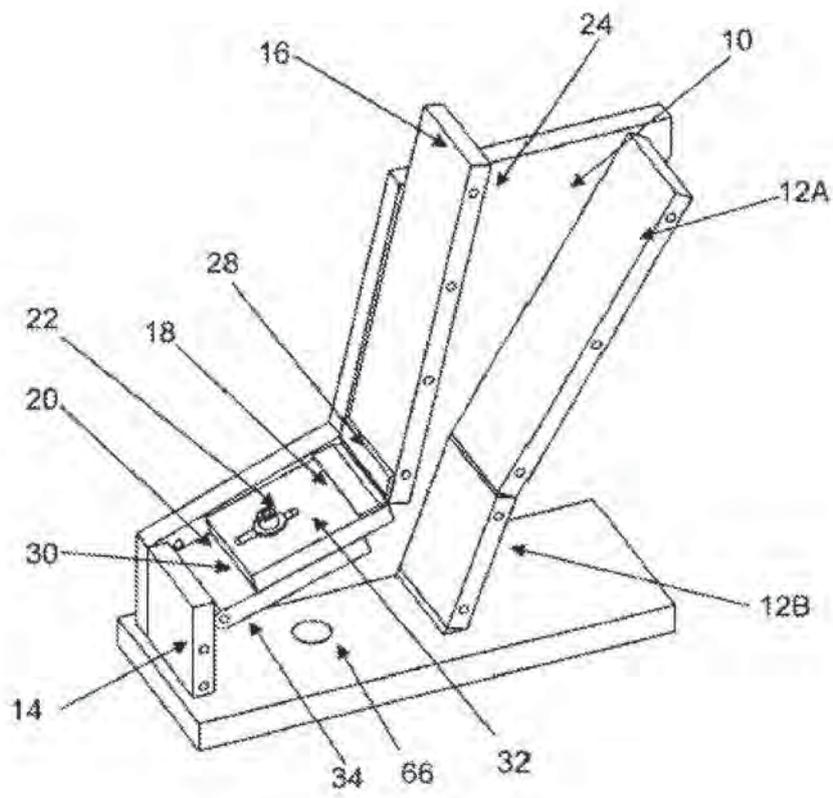


FIG. 1A

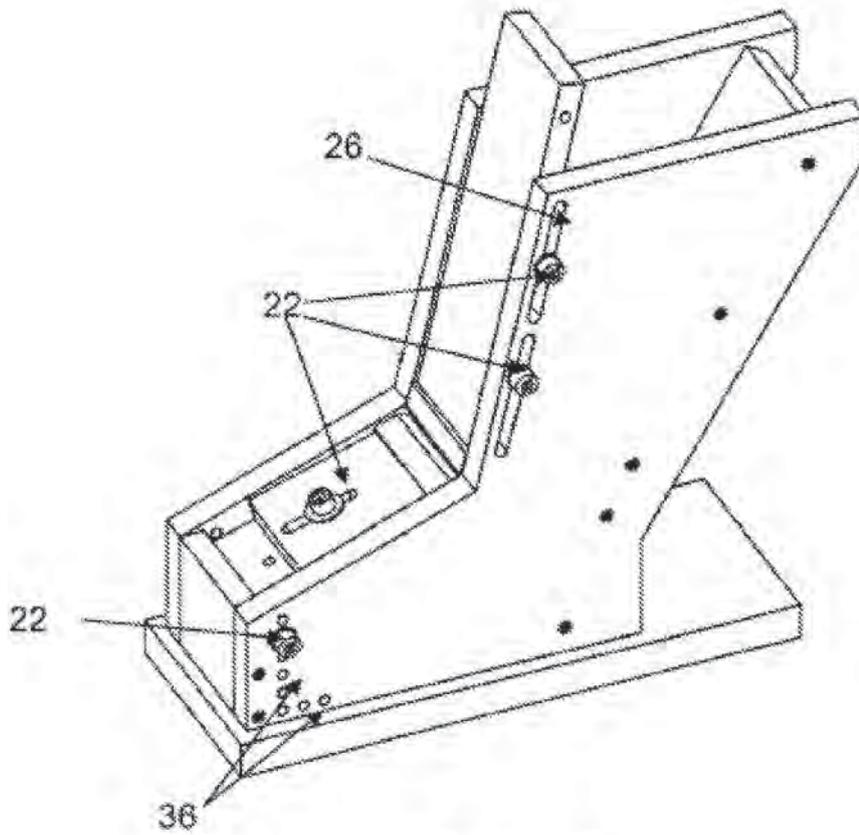


FIG. 1B

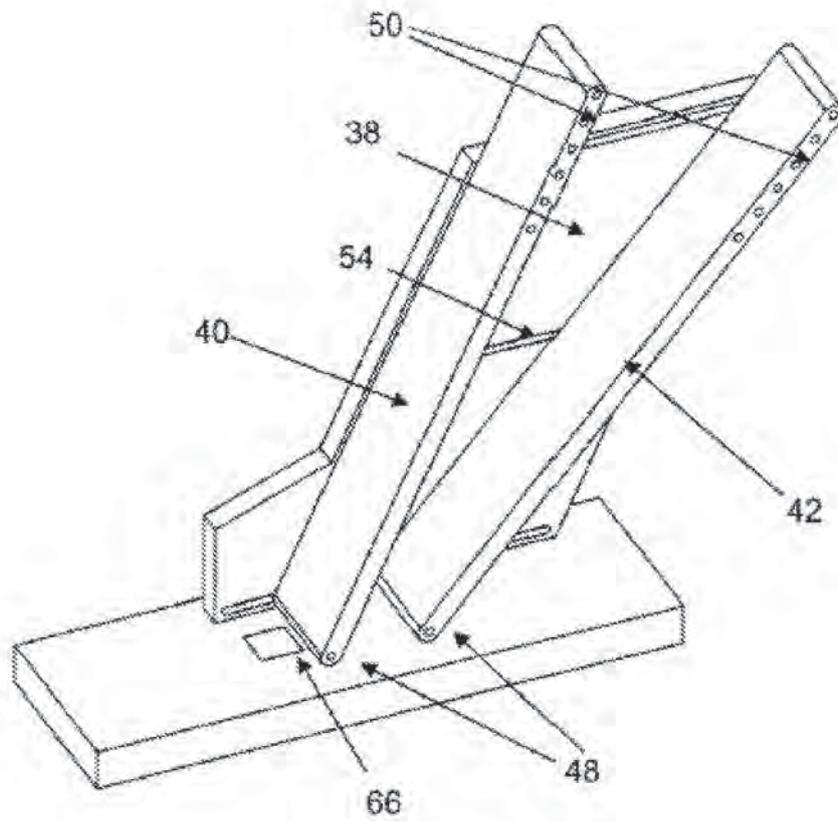


FIG. 2A

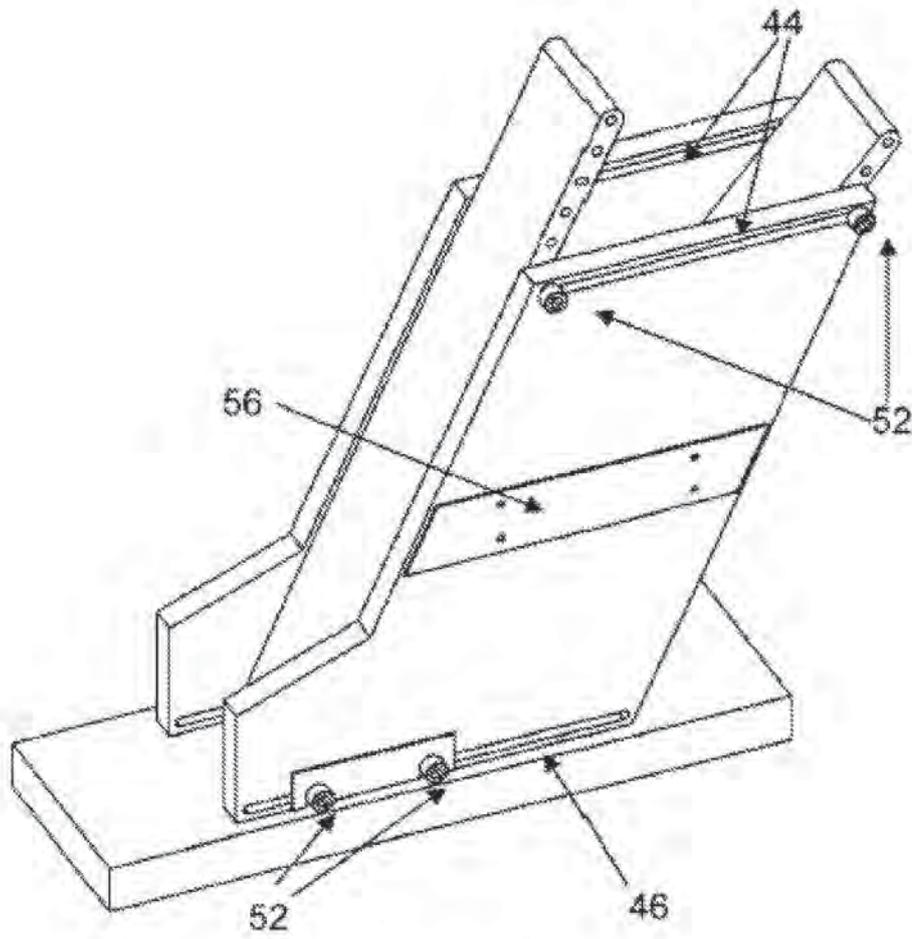


FIG. 2B

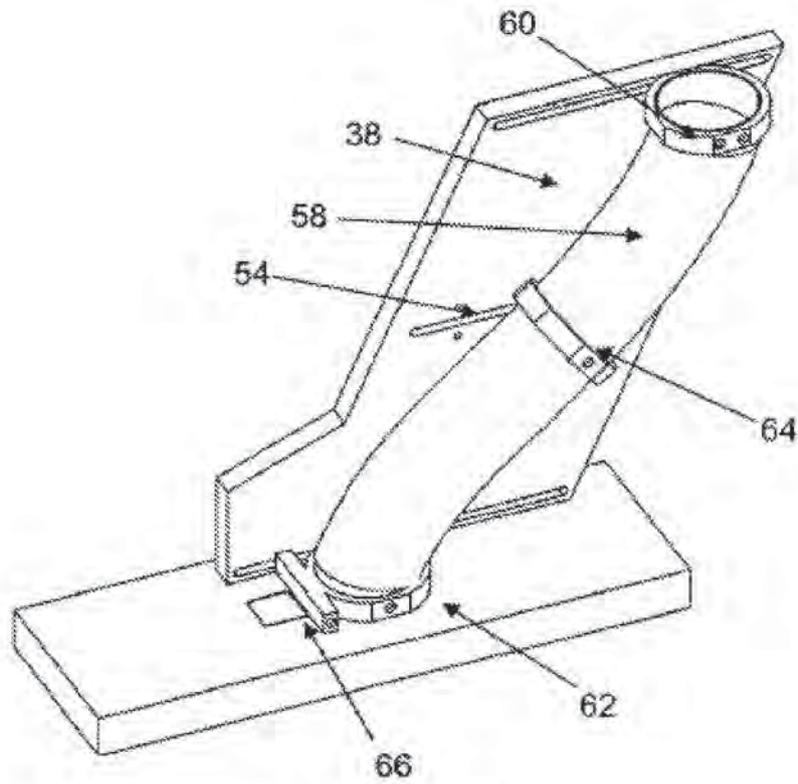


FIG. 3A

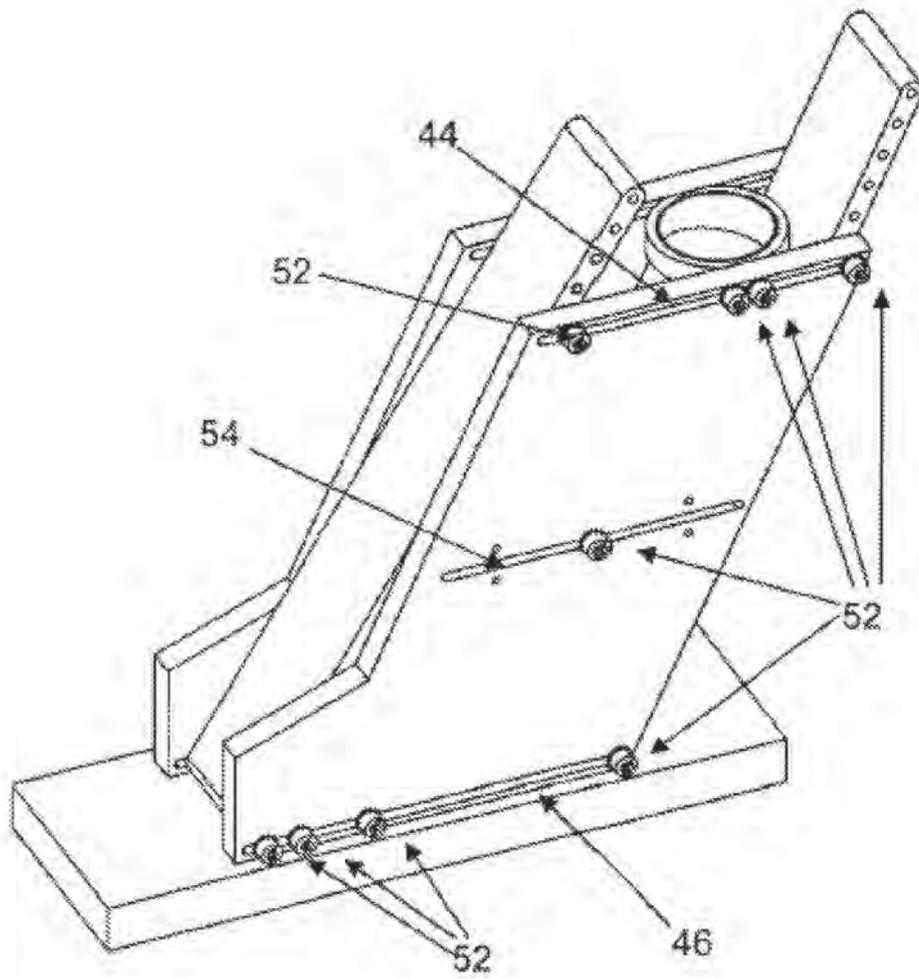


FIG. 3B

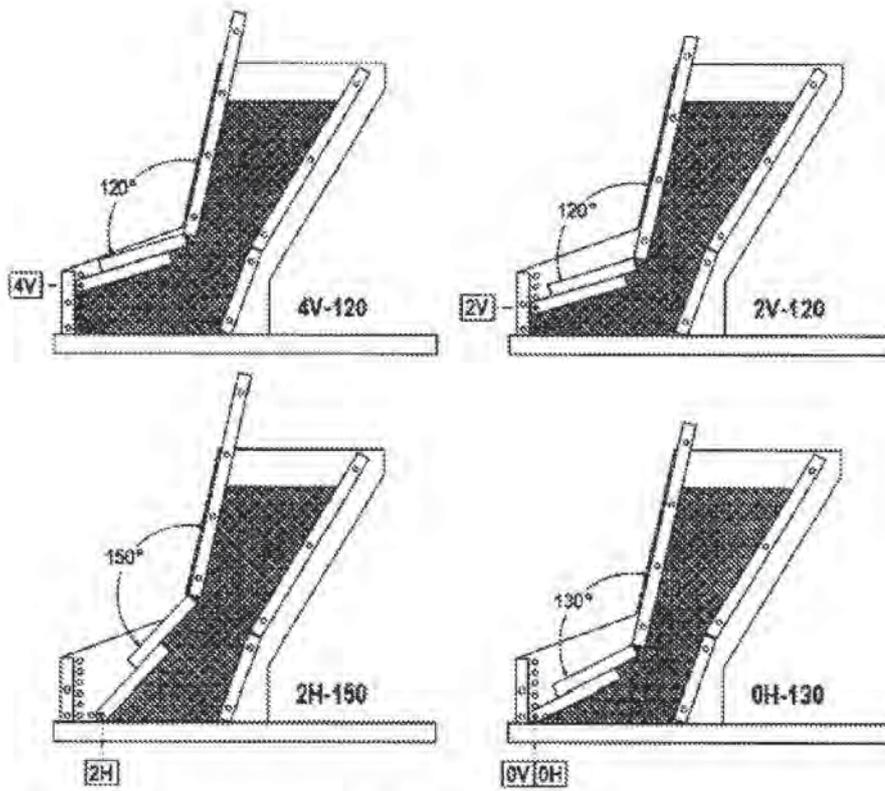


FIG. 4

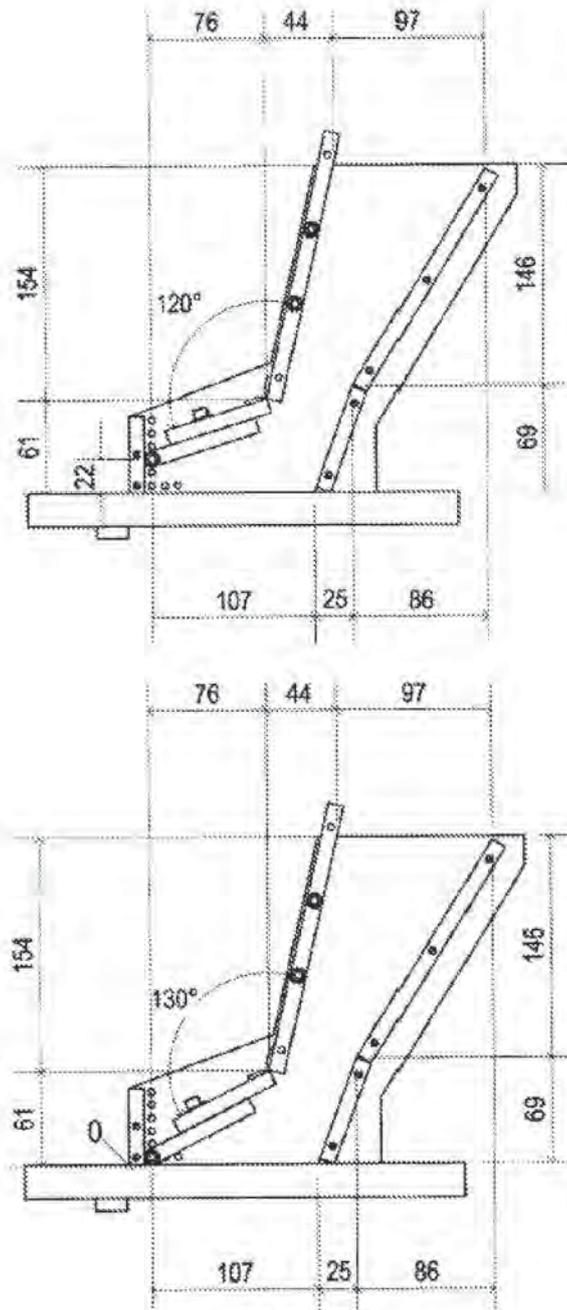


FIG. 5A

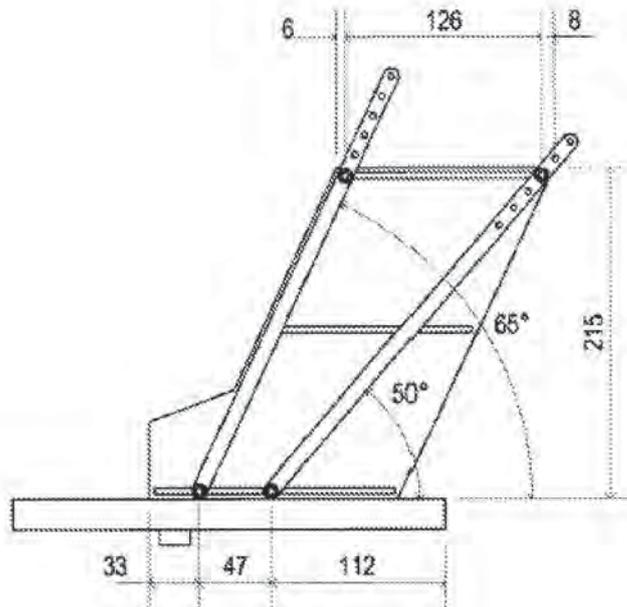
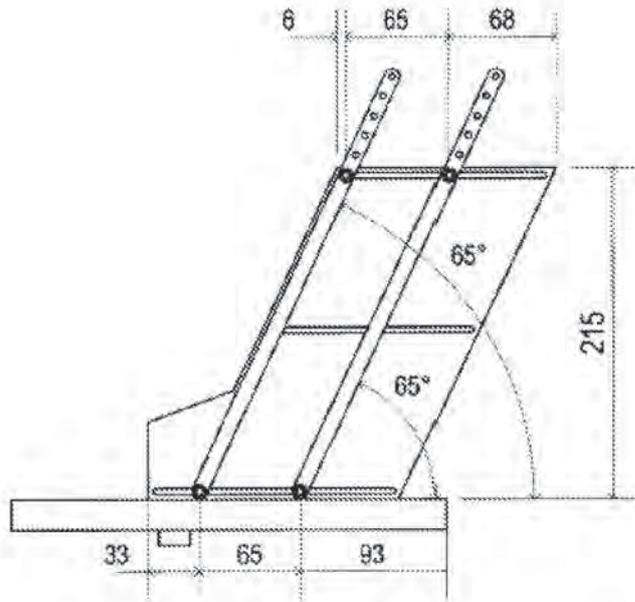


FIG. 5B

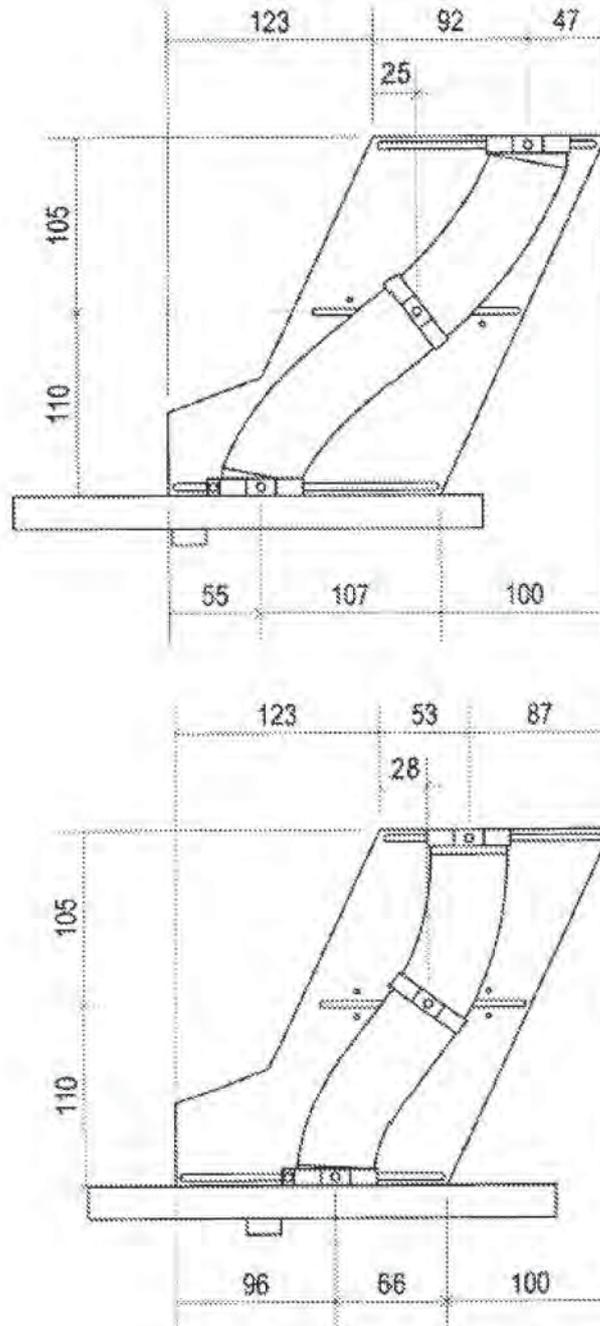


FIG. 5C

FEEDING CARRIAGE FOR COMPRESSOR MACHINE AND USE OF SAME

FIELD OF THE INVENTION

[0001] The present invention generally relates to the field of compressor machines and more specifically to a feeding carriage for compressor machines.

PRIOR ART

[0002] Compressor machines are widely used in different technical fields, such as, for example, in pharmacy, in the preparation of vitamins, compacted mechanical parts, micro-electronics, etc. Compressor machines are used together with a feeding carriage, providing a mold of the compressor machine with the starting particulate material in which said particulate material is compressed for producing the final compressed article.

[0003] Two main types of compressor machines are known: eccentric machines and rotary machines. Eccentric machines have a single mold, provided with one or more compression chambers and inserted in a part referred to as base plate. In such machines, the mold is fixed in place and the feeding carriage moves with a movement which allows filling the mold with particulate material, filling the mold completely, eliminating the remaining particulate material, and ejecting the final compressed article.

[0004] Rotary compressor machines in turn have several molds and punches inserted in a circular movable base plate. In this case, the feeding carriage is fixed in place.

[0005] When using compressor machines fed by means of a carriage or hopper, a phenomenon referred to as segregation occurs, causing non-homogenous filling of the mold of the compressor machine with particulate material. Obviously, this phenomenon is worsened when the particulate material is formed by a mixture of particles of different materials with different properties. This segregation phenomenon is particularly detrimental in applications in which it is important to maintain a specific proportion of the different materials used for manufacturing the final compressed article, such as in the pharmaceutical industry for tablet preparation.

[0006] Furthermore, other detrimental circumstances can also occur such as compaction problems derived from the fact that some particles remain stuck to the walls and others do not, the possibility of the pills breaking when printing numbers, logos, etc., thereon.

[0007] This segregation phenomenon, which consists of the clustering of similar particles, occurs by means of a combination of several mechanisms:

[0008] a condensation mechanism that occurs due to the difference in density between different particles making up the particulate material: heavier particles tend to be located in the lower portion and lighter particles in the upper portion;

[0009] a convection mechanism: this mechanism occurs in mixtures of particles having different sizes which, when subjected to certain vibration conditions, experience cyclic movement which causes them to accumulate in localized regions;

[0010] segregation by percolation caused by small particles entering empty spaces generated by larger particles, in the direction of gravitational acceleration, until the granular structure tends to locally consist of the same particles; and

[0011] a segregation trajectory through which the effects of friction reduce the speeds of smaller or more angular particles in a thin layer of moving material.

[0012] The combination of one or more of the preceding mechanisms therefore causes the segregation or separation of different particles making up a starting particulate material as it moves from the feeding carriage to the mold of the compressor machine.

[0013] A first segregation phenomenon can occur when filling the feeding carriage given that the particles fall at different speeds depending on their properties and also bounce off one another and the walls of the carriage in a different manner.

[0014] Therefore, the properties of the particles (density, shape, size, etc.), the coefficients of friction (static and rolling) and the coefficient of restitution (in particle-particle and particle-carriage contacts), the carriage geometry, etc., affect this first segregation phenomenon.

[0015] The continuous filling of the mold/molds also causes a segregation phenomenon, given that the particles move within the carriage at different speeds due to the aforementioned factors.

[0016] In the case of eccentric compressor machines in which the feeding carriage is subjected to a continuous movement as mentioned above, this movement of the carriage causes an additional segregation of the particles present therein due to the previously mentioned factors.

[0017] As mentioned above, the feeding carriage geometry influences said segregation phenomena. However, it is not possible to design a feeding carriage with a universal optimum geometry which reduces segregation phenomena since said segregation also depends on other factors such as the properties and proportions of the different particles making up the particulate material, etc.

[0018] Patent document U.S. Pat. No. 6764296 discloses a fluidizing method for fluidizing the content of a feeding carriage in order to reduce these segregation phenomena. The particulate materials are passed through a fluidizer which is partitioned by means of a distributor plate to form first and second chambers. The particulate materials pass through said first chamber which is in gaseous communication with said second chamber by means of the porous distributor plate. Gas is delivered to the second chamber at a pressure sufficient to generate a gas bearing between the porous distributor plate and the particulate material. The gas is allowed to migrate through the particulate material, and then be vented to the surrounding atmosphere without causing substantial turbulence in the particulate material.

[0019] However, homogenization of the particulate material is hard to control by means of the method disclosed in patent document U.S. Pat. No. 6764296, and therefore it is not possible to assure that the final compressed articles will have the necessary weight and composition uniformity.

[0020] Therefore, there is still a need in the art for a feeding carriage which allows reducing segregation phenomena occurring when manufacturing compressed articles, thereby obtaining an improvement in weight and composition uniformity of said compressed articles.

DISCLOSURE OF THE INVENTION

[0021] The present invention solves the problems of the prior art by disclosing a feeding carriage for a compressor machine the geometry of which can be changed depending on the properties and proportions of the particles making up the

starting particulate material, such that segregation phenomena occurring within said feeding carriage are minimized.

[0022] 15

[0023] Specifically, according to a first aspect the present invention discloses a feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold. At least some of the elements forming the feeding carriage of the present invention can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the feeding carriage located between both ends. The term "move" must be interpreted in a broad sense, said term being able to refer to "modifying" the position of the elements of the carriage in order to modify the geometry thereof, "changing the diameter" of the carriage in order to modify the geometry thereof or "changing" the section of the carriage, among other equivalent concepts.

[0024] According to a second aspect, the present invention discloses use of a feeding carriage for a compressor machine according to the first aspect of the present invention. The use according to the second aspect of the present invention comprises the steps of:

[0025] determining optimum carriage geometry for a particulate material to be compressed;

[0026] applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage;

[0027] filling the feeding carriage with the particulate material; and

[0028] operating the compressor machine to manufacture the compressed articles.

[0029] As will be described below in the present document, optimum carriage geometry can be determined by means of empirical tests or by means of computer simulation.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0030] The present invention will be better understood in reference to the following drawings illustrating preferred embodiments of the invention which are provided by way of example and must not be interpreted as limiting of the invention.

[0031] FIGS. 1A and 1B show perspective views of a feeding carriage according to a first preferred embodiment of the present invention.

[0032] FIGS. 2A and 2B show perspective views of a feeding carriage according to a second preferred embodiment of the present invention.

[0033] FIGS. 3A and 3B show perspective views of a feeding carriage according to a third preferred embodiment of the present invention.

[0034] FIG. 4 shows side section views of a feeding carriage according to the first preferred embodiment of the invention in four different geometric configurations.

[0035] FIG. 5A shows side section views of a feeding carriage according to the first preferred embodiment of the invention in two different geometric configurations.

[0036] FIG. 5B shows side section views of a feeding carriage according to the second preferred embodiment of the invention in two different geometric configurations.

[0037] FIG. 5C shows side section views of a feeding carriage according to the third preferred embodiment of the invention in two different geometric configurations.

DETAILED DISCLOSURE OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

[0038] As it is used throughout the present document and in the attached claims, the term "compressor machines" refers to machines used in any technical field for the preparation of compressed articles (pharmaceutical tablets, vitamins, parts for microelectronics, compacted structural parts, etc.) which can be fed with particulate material from a feeding carriage.

[0039] As it is used throughout the present document and in the attached claims, the term "particulate material" refers to any type of material used for the preparation of articles compressed by means of compressor machines, regardless of the size and shape (cylindrical, spherical, etc.) thereof.

[0040] FIGS. 1A and 1B show a feeding carriage according to a first preferred embodiment of the present invention. This feeding carriage is formed by two side plates (10), two rear plates (12A, 12B) and a fixed lower front plate (14). These elements will remain fixed firmly in place for all the configurable feeding carriage geometries. The rear plates (12A, 12B) and the fixed lower front plate (14) are attached to the side plates (10) in a conventional manner by means of nuts and bolts. However, the person skilled in the art will understand that other attachment means such as welding, adhesives, etc., can be used.

[0041] In order to change its geometry, the feeding carriage further comprises a movable upper front plate (16), a first sliding front plate (18) and a second sliding front plate (20).

[0042] The upper front plate (16) can be fixed to both side plates (10) by means of nuts and bolts (22) in a plurality of positions. To that end, as can be seen in FIG. 1A, the upper front plate (16) has a plurality of threaded holes (24). In turn, as seen in FIG. 1B, the side plates (10) have a pair of grooves (26). The nuts and bolts are introduced through the grooves (26) into the threaded holes (24) for fixing the upper front plate (16) to the side plates (10) in the desired position.

[0043] The first sliding front plate (18) is in turn attached to the upper front plate (16) by means of a hinge (28) which allows changing the angle of inclination formed between both, thereby providing one more degree of freedom for changing the feeding carriage geometry.

[0044] The first sliding front plate (18) is attached to the second sliding front plate (20) by means of nuts and bolts (22) through a threaded hole (30) present in the second sliding front plate (20) and a groove (32) present in the first sliding front plate (18), said groove (32) allowing relative sliding of one sliding front plate with respect to the other. According to the preferred embodiment, the second sliding front plate (20) has a plurality of threaded holes (30), such that the first sliding front plate (18) and the second sliding front plate (20) can be fixed to one another in a plurality of positions by means of nuts and bolts (22) through the groove (32) and any one of the plurality of threaded holes (30).

[0045] Finally, the second sliding front plate (20) can be fixed to both side plates (10) by means of nuts and bolts (22) in a plurality of positions. To that end, the second sliding front plate (20) has a threaded hole (34) arranged to coincide with one of the plurality of holes (36) present in the side plates (10). Therefore, as will be described below in the present document, depending on which of the plurality of holes (36) of the side plates (10) in which the threaded hole (34) of the second sliding front plate (20) is fixed, the feeding carriage will have a different geometry that will influence segregation phenomena experienced by the particulate material therein.

[0046] According to the embodiment shown in FIGS. 1A and 1B, the second sliding front plate (20) can be fixed to the side plates (10) in eight different geometric configurations, whereby providing a wide choice for the feeding carriage geometry in order to reduce segregation phenomena occurring to the minimum. Obviously, the person skilled in the art will understand that this embodiment is not limiting and that other feeding carriages according to the present invention with a greater or smaller number of possible geometric configurations can be designed.

[0047] The attached FIGS. 2A and 2B show a second preferred embodiment of the feeding carriage of the present invention. According to this second embodiment, the feeding carriage is formed by two side plates (38), a front plate (40) and a rear plate (42). Each side plate (38) has an upper groove (44) and a lower groove (46). The front plate (40) and the rear plate (42) each have a lower threaded fixing hole (48) and a plurality of upper threaded fixing holes (50) for fixing said front plate (40) and rear plate (42) to the side plates (38) in a plurality of positions by means of nuts and bolts (52) through the lower grooves (46) and upper grooves (44), respectively.

[0048] The feeding carriage according to this second preferred embodiment of the invention therefore allows changing the entire carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end.

[0049] As can be seen in FIG. 2A, the side walls (38) also comprise an intermediate groove (54) the function of which is to adapt the feeding carriage for use according to a third preferred embodiment of the present invention described below in the present document. Given that said intermediate groove (54) is not of use according to this second preferred embodiment of the present invention, it is covered with a cover (56) to prevent the particulate material from leaking out through said intermediate groove (54).

[0050] FIGS. 3A and 3B show a third preferred embodiment of the feeding carriage of the present invention. In this case, the composition of the feeding carriage is substantially similar to that of the feeding carriage according to the second preferred embodiment of the present invention described above, with the difference that it further comprises an inner tube (58) which runs along the feeding carriage from its upper filling end to its lower discharging end. The inner tube (58) is intended for containing therein the particulate material. The inner tube (58) has a first clamp (60) at its upper end, a second clamp (62) at its lower end and an intermediate clamp (64). Each clamp (60, 62, 64) comprises at least one threaded hole for fixing same by means of nuts and bolts to the side plates (38) through the upper grooves (44), lower grooves (46) and intermediate grooves (54), respectively, in a plurality of positions.

[0051] According to another embodiment of the present invention, the feeding carriage is formed by a tube (58), preferably made of a flexible material which allows bending but is rigid enough to maintain the fixed position. Said tube (58) has fixing means which allow changing the entire feeding carriage geometry. Said fixing means can be a first clamp (60) at its upper end and a second clamp (62) at its lower end, although other equivalent fixing means are allowed, whereby fixing points which allow changing the entire feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end are provided. To fix the tube and to enable determining its geometry by means of the parameters indicated in the present specification, said tube can be fixed to a side plate (38) having an upper groove (44) and a lower groove (46), where the tube

can be fixed by means of clamps (60, 62). The feeding carriage can comprise an intermediate clamp (64) for providing another fixing point.

[0052] The person skilled in the art will understand that the tube (58) can have a circular section, a square section or another suitable section type. At the same time, said section can remain constant or change along the path of the tube, as needed.

[0053] The feeding carriage according to the present invention (shown by way of example according to the preferred embodiments thereof) therefore allows changing the inner geometry thereof (either at its lower end or along the entire inner path of the feeding carriage) for the purpose of finding an optimum geometry which minimizes the segregation effects for each specific particulate material that is being used. Tablets that are uniform in weight and composition are thereby obtained when compressing the particulate material in a mold (66) of the compressor machine.

[0054] The present invention also discloses the use of a feeding carriage for a compressor machine such as any of those described above in the present document. Use according to the present invention comprises the steps of:

[0055] determining optimum carriage geometry for a particulate material to be compressed;

[0056] applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage;

[0057] filling the feeding carriage with the particulate material; and

[0058] operating the compressor machine to manufacture the compressed articles.

[0059] The step of determining optimum carriage geometry can be performed empirically carrying out a series of tests until attaining said optimum geometry, or by means of computer simulation. Specifically, according to a preferred embodiment of the present invention the step of determining optimum carriage geometry comprises:

[0060] a) applying a first geometry to the feeding carriage;

[0061] b) manufacturing compressed articles with said first geometry;

[0062] c) analyzing the composition of the compressed articles;

[0063] d) repeating steps a)-c) for a plurality of different carriage geometries; and

[0064] e) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries applied to the feeding carriage.

[0065] According to a second preferred embodiment of the present invention, the step of determining optimum carriage geometry comprises:

[0066] a) entering parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage in computer software;

[0067] b) performing particulate material segregation simulations with different feeding carriage geometries by means of said computer software; and

[0068] c) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries simulated for the feeding carriage.

[0069] The computer software preferably performs said simulation based on the discrete element method (DEM). DEM is used in the art for studying segregation phenomena. It is an effective method for addressing discontinuous and

granular material engineering and is particularly useful for studying granular particle flows, powder mechanics and rock mechanics.

[0070] The parameters which affect particulate material segregation in the feeding carriage and must be entered in the computer software to allow performing said simulation include, for example, the dimensions and density of the particulate material, as well as preferably also the coefficient of restitution, the coefficient of static friction and the coefficient of rolling friction between the particles of the particulate material and between the particulate material and feeding carriage.

[0071] Two illustrative and non-limiting examples of determining optimum carriage geometry for a feeding carriage according to the present invention are described below.

EXAMPLE 1

[0072] In this first example, mixtures with two components, C1 and C2, were studied. Component C1 consisted of cylinders 1.6 mm in diameter and 1.6 mm in height and with a density of 1104 kg/cm³. Component C2 consisted of cylinders 2.1 mm in diameter and 3.4 mm in height and with a density of 1021 kg/cm³. Three mixtures of these components C1/C2 at 75%/25%, 25%/75% and 50%/50% were studied.

[0073] FIG. 4 shows the four carriage geometries studied for determining optimum geometry for each of those mixtures. Reciprocating movement of an actual feeding carriage was reproduced in terms of movements, times, speeds and accelerations in all the simulations. The studied geometries were:

[0074] 4V-120: The second sliding front plate fixed to vertical hole 4 of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 120°.

[0075] 2V-120: The second sliding front plate fixed to vertical hole 2 of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 120°.

[0076] 2H-150: The second sliding front plate fixed to horizontal hole 2 of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 150°.

[0077] 0H-130: The second sliding front plate fixed to hole 0 (corner hole) of the side plates. The first sliding front plate and the upper front plate form an angle of 130°.

[0078] The root-mean-square error (RMSE) corresponding, on one hand, to the first 50 tablets obtained and, on the other hand, to tablets 20-50 obtained in the so-called rated operating condition, was determined for each simulation. In fact, a first segregation phenomenon affecting approximately the first 20 tablets occurs when filling the non-operating feeding carriage. Tablets 20-50 are only affected by the actual segregation of the reciprocating movement of the feeding carriage.

[0079] Table 1 below shows the RMSE between the theoretical percentage of the reference component and the actual percentage of said reference component in the first 50 tablets. The RMSE therefore shows the degree of segregation occurring in the process, such that the lower the RMSE, the less the segregation that took place. Therefore, the values in bold indicate optimum carriage geometry.

TABLE 1

Percentage of components	Configuration				Reference component (theoretical percentage)
	C1/C2	4V-120	2V-120	2H-150	
75/25	6.40	3.97	4.02	3.49	C2 (25%)
25/75	6.02	3.68	4.26	3.78	C1 (25%)
50/50	7.87	4.88	4.50	4.85	C1/C2 (50%)

[0080] Table 2 below shows the RMSE between the theoretical percentage of the reference component and the actual percentage of said reference component of tablet 20 to tablet 50. The values in bold indicate optimum carriage geometry.

TABLE 2

Percentage of components	Configuration				Reference component (theoretical percentage)
	C1/C2	4V-120	2V-120	2H-150	
75/25	4.34	2.38	3.36	2.15	C2 (25%)
25/75	3.17	2.02	3.87	1.88	C1 (25%)
50/50	5.03	2.37	4.26	2.53	C1/C2 (50%)

[0081] As can be seen from the preceding tables, optimum carriage configuration changes with the proportion of the different particles making up the particulate material used as raw material. Therefore, there is a proven need for a carriage having a variable geometry such as the one disclosed in a novel manner by the present invention which is adaptable and can provide optimum configuration for each composition of different particulate material used as raw material.

EXAMPLE 2

[0082] Simulations similar to those in Example 1 were performed by means of the discrete element method. In this case, the particles making up the particulate material were:

[0083] Component C1: Spheres 2 mm in diameter and with a density of 1150 kg/cm³.

[0084] Component C2: Spheres 4 mm in diameter and with a density of 1150 kg/cm³.

[0085] In this case, other additional parameters also affecting segregation phenomena occurring inside the feeding carriage were also taken into account in the computer simulation. These parameters are summarized in Table 3 below:

TABLE 3

		C1	C2
Coefficient of restitution	Particle-carriage	0.2	0.2
	Particle-particle	0.7	0.7
Coefficient of static friction	Particle-carriage	0.5	0.5
	Particle-particle	0.5	0.5
Coefficient of rolling friction	Particle-carriage	0	0
	Particle-particle	0.5	0.5

[0086] Three different proportions of components C1/C2 at 15%/85%, 85%/15% and 50%/50% were studied in two different geometries of each of the three preferred embodiments of the feeding carriage of the present invention described above in the present document (FIGS. 1A, 1B; 2A, 2B; and 3A, 3B, respectively).

[0087] The attached FIGS. 5A, 5B and 5C each show the two studied feeding carriage configurations according to several preferred embodiments of the present invention. The dimensions included in said drawings constitute the exact geometric arrangements under study.

[0088] Tables 4, 5 and 6 below show the RMSE results obtained for each of the configurations studied for each of the feeding carriage configurations. Once again, values in bold indicate optimum carriage geometry for each case.

TABLE 4

First embodiment of the feeding carriage			
Percentage of components	Configuration		Reference component
C1/C2	A	B	(theoretical percentage)
15/85	5.822	6.293	C1 (15%)
85/15	6.401	5.433	C2 (15%)
50/50	8.818	7.024	C1 (50%)

TABLE 5

Second embodiment of the feeding carriage			
Percentage of components	Configuration		Reference component
C1/C2	A	B	(theoretical percentage)
15/85	7.718	4.178	C1 (15%)
85/15	6.648	8.586	C2 (15%)
50/50	6.138	7.626	C1 (50%)

TABLE 6

Third embodiment of the feeding carriage			
Percentage of components	Configuration		Reference component
C1/C2	A	B	(theoretical percentage)
15/85	2.471	3.911	C1 (15%)
85/15	5.293	5.277	C2 (15%)
50/50	4.339	6.022	C1 (50%)

[0089] Although the present invention has been described in reference to several preferred embodiments thereof, the person skilled in the art will understand that modifications and variations can be applied thereto without departing from the essence and scope of the present invention.

[0090] For example, although several embodiments of feeding carriages for compressor machines the geometry of which can be changed according to several configurations have been described, it must be understood that the invention is not limited to said embodiments and generally relates to a feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold, provided that at least some of the elements forming said feeding carriage can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the feeding carriage located between both ends. In practice, being able to define all the geometric parameters of

the carriage which can have different shape variations (regardless of its shape, it is possible to determine/calculate its geometry) and being able to define the different parameters of the actual mixture to be compressed and other mechanical parameters of the process enable determining said optimum carriage geometry by means of software or by empirical means, which significantly reduces the segregation effect of the compressed material. Once the optimum geometry is determined, the carriage is suitably configured according to the determined data.

[0091] Likewise, although a feeding carriage according to the first preferred embodiment of the invention having two rear plates has been described, it must be understood that additional embodiments of said feeding carriage can have a single rear plate, or more than two rear plates, without departing from the scope of the invention.

[0092] Similarly, although a feeding carriage according to the third preferred embodiment of the invention having an intermediate groove and an intermediate clamp has been described, it must be understood that other embodiments of the feeding carriage may lack said intermediate groove and intermediate clamp.

[0093] The different elements forming the feeding carriage of the present invention can be any suitable material commonly used in the art, such as steel, for example. In the case of comprising an inner tube, it can be manufactured from any suitable material, such as polyethylene, PVC, steel, etc.

[0094] The feeding carriage of the present invention can have number markings, angle markings, etc., to help the user configure the different possible geometries thereof.

[0095] The feeding carriage of the present invention can be applied to any suitable type of compressor machine, be it an eccentric machine or a rotary machine.

1. A feeding carriage for a compressor machine of the type having an upper filling end through which a particulate material which is to be compressed in a mold of the compressor machine is introduced and a lower discharging end for discharging said particulate material towards said mold, wherein at least some of the elements forming said feeding carriage can move with respect to one another, which thereby allows modifying the geometry of at least one of said lower discharging end, said upper filling end and an intermediate portion of the feeding carriage located between both ends.

2. The feeding carriage according to claim 1, wherein it is formed by two side plates, at least one rear plate, a fixed lower front plate, a movable upper front plate, a first sliding front plate and a second sliding front plate which allow changing the feeding carriage geometry.

3. The feeding carriage according to claim 2, wherein:

the upper front plate can be fixed to each side plate in a plurality of positions by means of nuts and bolts through a plurality of threaded holes in the upper front plate and a plurality of corresponding grooves in each side plate;

the first sliding front plate is attached to the upper front plate by means of a hinge which allows changing the angle of inclination formed between both;

the first sliding front plate is attached to the second sliding front plate by means of nuts and bolts through a threaded hole present in one of the first or second sliding front plates and a groove present in the other one of the second or first sliding front plates, said groove allowing relative sliding of one sliding front plate with respect to the other;

the second sliding front plate can be fixed to each side plate in a plurality of positions by means of nuts and bolts through a threaded hole in the second sliding front plate and one of a plurality of holes in each side plate;

whereby the different possible fixing positions of the upper front plate, the first sliding front plate and the second sliding front plate allow changing the geometry of the lower discharging end of the feeding carriage.

4. The feeding carriage according to claim 2, wherein the first sliding front plate has a groove and the second sliding front plate has a plurality of threaded holes allowing the fixing of the first sliding front plate and the second sliding front plate by means of nuts and bolts through any one of said plurality of threaded holes and the groove in a plurality of positions.

5. The feeding carriage according to claim 1, wherein it is formed by two side plates, a movable front plate and a movable rear plate, whereby it allows changing the feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end.

6. The feeding carriage according to claim 5, wherein the side plates have an upper groove and a lower groove, the front and rear plates have a lower threaded fixing hole and a plurality of upper threaded fixing holes for fixing said front plate and rear plate to the side plates in a plurality of positions by means of nuts and bolts through the lower grooves and upper grooves, respectively, whereby it allows changing the feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end.

7. The feeding carriage according to claim 6, wherein it further comprises an inner tube running along the feeding carriage from its upper filling end to its lower discharging end and intended for containing therein the particulate material, the inner tube having a first clamp at its upper end and a second clamp at its lower end, each clamp having at least one threaded hole for fixing thereof by means of nuts and bolts to the side plates through the upper grooves and lower grooves in a plurality of positions.

8. The feeding carriage according to claim 7, wherein each of the side walls further comprises an intermediate groove between the upper groove and the lower groove, and the inner tube further comprises an intermediate clamp with at least one threaded fixing hole for fixing thereof by means of nuts and bolts to the side plates through the intermediate grooves.

9. The feeding carriage according to claim 1, wherein it is formed by a tube, said tube having a first clamp at its upper end and a second clamp at its lower end whereby fixing points

which allow changing the feeding carriage geometry from its upper filling end to its lower discharging end are provided.

10. The feeding carriage according to claim 9, wherein it comprises an intermediate clamp for providing another fixing point.

11. A method of using a feeding carriage for a compressor machine of claim 1, comprising the steps of:

determining optimum carriage geometry for a particulate material to be compressed;

applying said optimum carriage geometry to the feeding carriage;

filling the feeding carriage with the particulate material; and

operating the compressor machine to manufacture the compressed articles.

12. A method according to claim 11, wherein the step of determining optimum carriage geometry comprises:

a) applying a first geometry to the feeding carriage;

b) manufacturing compressed articles with said first geometry;

c) analyzing the composition of the compressed articles;

d) repeating steps a)-c) for a plurality of different carriage geometries; and

e) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries applied to the feeding carriage.

13. A method according to claim 11, wherein the step of determining optimum carriage geometry comprises:

a) entering parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage in computer software;

b) performing particulate material segregation simulations with different feeding carriage geometries by means of said computer software; and

c) determining the optimum geometry for the particulate material used from among the plurality of geometries simulated for the feeding carriage.

14. A method according to claim 13, wherein the parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage include the dimensions and density of the particulate material.

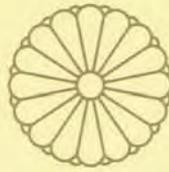
15. A method according to claim 14, wherein the parameters affecting particulate material segregation in the feeding carriage furthermore include the coefficient of restitution, the coefficient of static friction and the coefficient of rolling friction between the particles of the particulate material and between the particulate material and the feeding carriage.

* * * * *

PATENTES

PATENTE JAPONESA

ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR EN
UNA MÁQUINA COMPRESORA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)



特許証
(CERTIFICATE OF PATENT)

特許第5976962号
(PATENT NUMBER)

発明の名称
(TITLE OF THE INVENTION)

圧縮機械用供給装置およびその使用方法

特許権者
(PATENTEE)

スペイン国 ログローニョ イー 26006,
オーティーアルアイ アベニダ デ ラ
パズ 93
国籍 スペイン
ユニベルシダッド デ ラ リオハ

発明者
(INVENTOR)

その他別紙記載
アルバ エリアス, フェルナンド
マルティネス マルティネス, ローラ
ゴンサレス マルコス, アナ

出願番号
(APPLICATION NUMBER)

特願2015-558512

出願日
(FILING DATE)

平成26年 5月21日(May 21, 2014)

登録日
(REGISTRATION DATE)

平成28年 7月29日(July 29, 2016)

その他別紙記載

この発明は、特許するものと確定し、特許原簿に登録されたことを証する。
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE JAPAN PATENT OFFICE.)

平成28年 7月29日(July 29, 2016)

特許庁長官
(COMMISSIONER, JAPAN PATENT OFFICE)

小宮義則



特許証

(CERTIFICATE OF PATENT)

(続葉 1)

特許第5976962号 (PATENT NUMBER)

特願2015-558512 (APPLICATION NUMBER)

特許権者
(PATENTEE)

スペイン国 マドリッド イー-28040,
ラミロ デ マエツ, 7

国籍 スペイン

ユニベルシダッド ポリテクニカ デ
マドリッド

発明者
(INVENTOR)

オルディレス メレ, ホアキン

[以下余白]

(TRANSLATION)

CERTIFICATE OF PATENT

PATENT NUMBER: 5976962

TITLE OF THE INVENTION:

"FEEDING CARRIAGE FOR COMPRESSOR MACHINE AND USE OF SAME"

PATENTEE:

OTRI Avenida de la Paz 93, E-26006 Logrono, SPAIN

Nationality: SPAIN

UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

Ramiro de Maeztu, 7, E-28040 Madrid, SPAIN

Nationality: SPAIN

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

INVENTOR(S):

ALBA ELIAS, Fernando;
MARTINEZ MARTINEZ, Laura;
GONZALEZ MARCOS, Ana y
ORDIERES MERE, Joaquin

APPLICATION NUMBER: 2015-558512 (Type: Patent)

FILING DATE: May 21, 2014

REGISTRATION DATE: July 29, 2016

THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE JAPAN
PATENT OFFICE

July 29, 2016

COMMISSIONER, JAPAN PATENT OFFICE

Yoshinori KOMIYA

