



PT2. Modelización y simulación de procesos de compactación

Entregable 2.2

Simulación de escenarios e interpretación de resultados

Financiado por:



1. Introducción

Caracterización de procesos y soluciones de control, caracterización de productos terminados, Simulación de escenarios, Validación del modelo

2. Caracterización de procesos

Una compactadora continua es capaz de fabricar placas cerámicas de grandes dimensiones, con anchuras de hasta 2000 mm y longitudes de hasta 3000 mm. En la Figura 1 se presenta un esquema general de una compactadora continua.

La máquina está equipada con una cinta de acero muy fina que envuelve los tres rodillos superiores. Estos rodillos giran, lo que transmite el movimiento a la cinta. El tercer rodillo tiene un mecanismo móvil, que permite tensar o destensar la cinta según sea necesario.

La compactación de la placa cerámica se realiza en la parte inferior del segundo rodillo. Este rodillo también puede desplazarse ligeramente hacia arriba o hacia abajo, lo que permite ajustar el grosor final de la placa cerámica producida.

La función de la placa móvil número cuatro consiste en tensar correctamente el trozo de cinta ubicado entre los dos primeros rodillos.

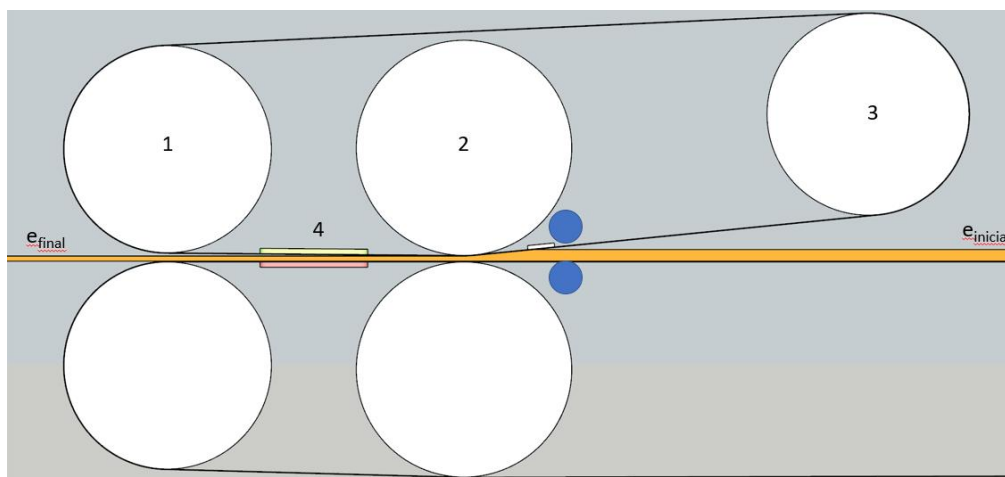


Figura 1: Esquema de la compactadora continua

En la Figura 2 se muestra la compactadora utilizada en este trabajo. En esta imagen se observa el rodillo delantero, la finísima cinta que envuelve los rodillos y la superficie por donde el polvo se desplaza hacia la compactadora.



Figura 2: Parte delantera de la compactadora

3. Caracterización de productos terminados

En el entregable 3.1 se hablará más detalladamente de la caracterización de los productos. En lo que respecta a este entregable más centrado en la comparación entre los resultados simulados y los obtenidos experimentalmente, las magnitudes que se compararán son la densidad y el espesor.

En este trabajo se han realizado cuatro maniobras, dos de ellas consistentes en modificar la altura del rodillo central y las otras dos consistentes en modificar la distancia entre el lecho de polvo y la parte inferior del rodillo central. Concretamente, en las dos primeras maniobras se desplazó 4 mm hacia abajo (M1) y arriba (M2) la posición del rodillo inferior respecto a la posición de referencia. De manera similar, en las otras dos maniobras se cambió 5 mm la posición relativa del polvo sobre el rodillo, en la maniobra 3 (M3) la distancia se redujo 5 mm mientras que en la maniobra 4 (M4) se aumentó 5 mm más.

Tabla 1: Comparación de la densidad y espesor de las dos primeras maniobras

Maniobra	Daps (kg/m ³)	Δ Dap	e (mm)	Δ e
M1	2089	31	9.17	-0.2
Ref	2058		9.37	
M2	2032	-27	9.49	0.12

Tabla 2: Comparación de la densidad y espesor de las dos últimas maniobras

Maniobra	Daps (kg/m ³)	Δ Dap	e (mm)	Δ e
M3	2052	-2	9.21	-0.17
Ref	2054		9.38	
M4	2070	20	9.49	0.11

Las densidades mostradas en la tabla están medidas en base húmeda, estos valores pueden ser distintos a los del entregable 3.1 ya que normalmente se trabaja con humedades en base seca.

Los valores experimentales medidos son consistentes con los valores que se esperarían. Las maniobras que reducen la distancia entre el polvo y el rodillo central (M1 y M4), lugar donde

tiene lugar la máxima compactación del polvo, disminuyen el espesor final de la pieza y aumentan la densidad final de la misma. En cambio, en las maniobras que separan esta distancia (M2 y M3), el espesor de la pieza aumenta y la densidad disminuye.

4. Simulación de escenarios

El primer paso para obtener resultados correctos es medir correctamente la geometría de la compactadora en continuo de la Figura 1. Hay que asegurarse que las distancias en la simulación sean las mismas distancias que las reales. En la siguiente imagen se adjuntan las coordenadas de cada uno de los elementos que se han utilizado para “dibujar” la prensa en continuo.

```
tipo,Pto1X,Pto1Y,Pto1Z,Pto2X,Pto2Y,Pto2Z,R
Punto,0.0,0.0,0.0,,,
Linea,0.0,0.0,0.0,1000.0,0.0,0.0,
Circulo,1005.0,449.29,0.0,,,384.5
Circulo,1650.0,105.29,0.0,,,79.5
Circulo,2075.0,419.29,0.0,,,399.5
Circulo,2550.0,125.29,0.0,,,79.5
Circulo,3163.0,449.29,0.0,,,374.65
Arco,1005.0,879.29,0.0,1005.0,19.3,0.0,430.0
Arco,3163.0,19.3,0.0,3163.0,879.29,0.0,430.0
Linea,1005.0,19.3,0.0,3413.0,19.3,0.0,
Linea,3413.0,879.3,0.0,1005.0,879.3,0.0,
```

Figura 3: Coordenadas (en milímetros) de los elementos básicos utilizados para crear la geometría de la prensa.

El siguiente paso ha sido introducir las propiedades del material en el programa de simulación. En el caso del polvo, se introdujeron todos los parámetros calibrados en el entregable 2.1. Se recuerda que el modelo utilizado de Drucker Prager Cap no viene incorporado por defecto en Abaqus, así que se ha puesto especial cuidado en declarar correctamente estas variables.

Material Behaviors

Cap Plasticity

Cap Hardening

Density

Depvar

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Cap Plasticity

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 1

	Material Cohesion	Angle of Friction	Cap Eccentricity	Init Yld Surf Pos	Transition Surf Rad	FlowStress Ratio	Field 1
1	168803	46.33522302	1.23753939	0.02	0.03	1	0.448461538
2	188846	47.3949	1.23753939	0.02	0.03	1	0.461538462
3	262679	50.36145	1.23753939	0.02	0.03	1	0.5
4	365378.5	53.1039	1.23753939	0.02	0.03	1	0.538461538
5	508230	55.62225	0.99201896	0.02	0.03	1	0.576923077
6	706932	57.9165	0.88078749	0.02	0.03	1	0.615384615
7	983319	59.98665	0.82868801	0.02	0.03	1	0.653846154
8	1367766	61.8327	0.82096306	0.02	0.03	1	0.692307692
9	1902519	63.45465	0.80904823	0.02	0.03	1	0.730769231
10	2646343	64.8525	0.80904823	0.02	0.03	1	0.769230769
11	3680978	66.02625	0.80904823	0.02	0.03	1	0.807692308
12	5120124	66.9759	0.80904823	0.02	0.03	1	0.846153846
13	7121929	67.70145	0.80904823	0.02	0.03	1	0.884615385
14	9906376	68.2029	0.80904823	0.02	0.03	1	0.923076923

Suboption Editor

Cap Hardening

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	Yield Stress	Vol Plas Strain
1	212000	0
2	347000	0.028742469
3	622000	0.108785177
4	850000	0.182893149
5	1200000	0.25188602
6	1850000	0.316424541
7	2960000	0.377049163
8	6710000	0.434207577
9	10000000	0.488274798
10	35500000	0.539568093
11	68200000	0.588358257
12	100000000	0.634878272
13	300000000	0.679330035
14	600000000	0.721889649

Figura 4: Propiedades utilizadas obtenidas a partir de la caracterización del polvo.

La Figura 5 presenta el mallado de la prensa en continuo. El mallado dentro del método de elementos finitos representa los lugares donde se van a resolver las ecuaciones que gobiernan las propiedades del material. Idealmente, se buscaría un mallado muy fino (denso), de tal manera que en cada lugar del espacio hubiera puntos. En la práctica, el tiempo de cálculo sería tan alto que las simulaciones serían muy costosas. Normalmente, se suele utilizar una malla suficientemente fina que añadirle más nodos no cambia significativamente el resultado.

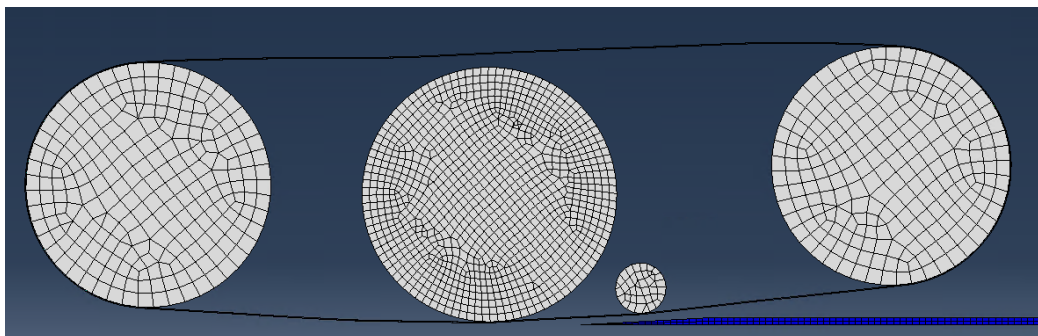


Figura 5: Mallado de la prensa en continuo.

En este caso en particular, el mallado del rodillo central adquirió especial relevancia a causa del contacto entre la cinta y los rodillos. En el párrafo anterior se ha hablado sobre la malla de los elementos finitos, cuando se malla una superficie circular, realmente no se malla como un círculo sino como un polígono con muchas caras, aproximándose a un círculo. Si la malla del cilindro no es suficientemente fina, la cinta se apoya sobre cada una de estas caras provocando perturbaciones. Estas perturbaciones afectaban directamente al espesor del polvo final. Para reducir al mínimo el daño causado por estas perturbaciones, se optó por mallar de manera extremadamente fina el rodillo central.

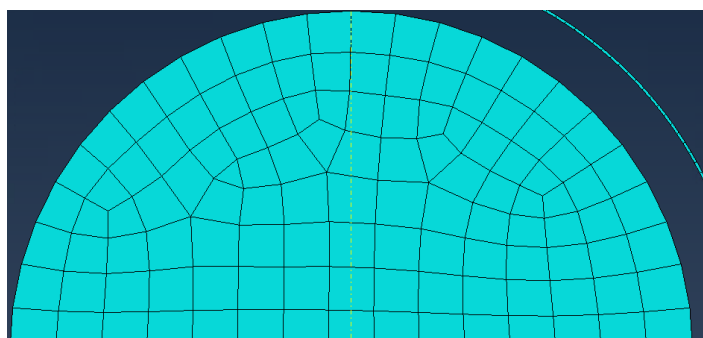


Figura 6: Ejemplo visual del mallado del cilindro derecho.

Para finalizar, el último paso que se requirió fue programar correctamente el modelo de Drucker Prager Cap de manera que el solver de Abaqus supiera entender cómo resolver las ecuaciones. Este proceso fue bastante complicado de hacer ya que requirió programar correctamente la subrutina de Abaqus.

5. Validación del modelo

En este apartado hay que hablar de una cosa positiva y otra negativa. Por una parte, la implementación del modelo ha sido correcta. Se ha estudiado, calibrado e incorporado en Abaqus un modelo de comportamiento físico de polvos granulares. Este modelo se ha puesto a prueba en el prensado en continuo.

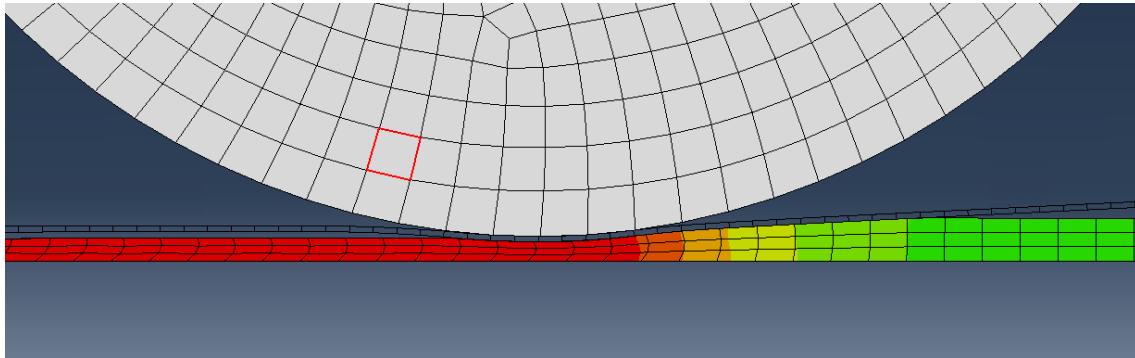


Figura 7: Representación de la densidad y espesor final de una pieza simulada.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran la densidad y la compresión del polvo después de ser compactado en la prensa en continuo. En ambas gráficas se observan irregularidades en la cara superior del polvo. Estas irregularidades están provocadas por el fallo en el contacto. Si el contacto funcionase bien, toda la cara superior debería obtener el mismo espesor. Los lugares donde el contacto ha fallado aparecen visibles en forma de picos.

El principal problema actual del modelo es la expansión post prensado. En la Figura 7 aparece representado por color la densidad de la pieza. Los colores más verdes indican una densidad menor, mientras que colores más rojos indican densidad mayor. En la imagen se puede comprobar como a medida que la pieza se va compactando, la densidad va aumentando. Sin embargo, el principal problema encontrado en la posterior expansión después de alcanzar el estado de máxima compresión. En la realidad, esta compresión es de aproximadamente de un 3-4%, mientras que en la simulación supera el 15%. Esto significa que después del estado de máxima compresión, la pieza aumenta bastante su espesor. Por lo que las predicciones de ellos espesores realizadas por el modelo son “bastante” más altas que las encontradas experimentalmente.