



# UNIVERSITAT JAUME I

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS  
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

***Estudio del proceso de granulación como  
alternativa eficiente a la atomización en la  
fabricación de baldosas cerámicas***

**TRABAJO FIN DE GRADO**

AUTOR/A

Enric Barreda Fabregat

DIRECTOR/A

Iván Cervera González

Castellón, Septiembre de 2015



Quiero dar las gracias al Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) por haberme permitido realizar las prácticas y por el apoyo prestado durante la realización de este proyecto



# **DOCUMENTOS**

**MEMORIA**

**ANEXOS**



**MEMORIA**



## Índice de la memoria

<b>1. Objetivo del proyecto</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Alcance</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Antecedentes</b> .....	<b>9</b>
3.1. Proceso de fabricación de baldosas cerámicas .....	9
3.2. Situación energética del sector.....	12
3.2.1. Consumo energético .....	12
3.2.2. Cogeneración .....	14
3.2.3. Medidas de ahorro energético.....	15
3.3. Proceso de granulación.....	16
3.3.1. Definición del proceso.....	16
3.3.2. Etapas del proceso de granulación .....	16
3.4. Tipos de granuladoras.....	18
3.5. Preparación del polvo .....	19
3.6. Aglutinantes .....	20
3.7. Características del material granulado para el prensado.....	22
<b>4. Experimentación</b> .....	<b>29</b>
4.1. Equipo y herramientas.....	29
4.2. Material y aglutinante.....	31
4.3. Variables analizadas.....	32
4.4. Método de ensayo .....	33
4.4.1. Ensayo de granulación. Metodología.....	33
4.4.2. Ensayos de caracterización .....	34
4.5. Ensayos iniciales.....	40
4.6. Diseño de experimentos .....	42
<b>5. Resultados y discusión</b> .....	<b>45</b>
5.1. Distribución granulométrica .....	45
5.1.1. Análisis de la influencia de las variables .....	45
5.1.2. Optimización del proceso.....	51
5.2. Ensayos de fluidez.....	55
5.3. Dureza de gránulo.....	57

5.4. Forma y esfericidad.....	58
<b>6. Estudio de viabilidad económica .....</b>	<b>61</b>
6.1. Hipótesis utilizadas .....	61
6.2. Cálculos realizados.....	64
6.3. Inversión.....	65
6.4. Gastos .....	66
6.5. Resultados.....	68
<b>7. Estudio del impacto ambiental.....</b>	<b>69</b>
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>71</b>
<b>9. Líneas futuras .....</b>	<b>75</b>
<b>10. Bibliografía: .....</b>	<b>77</b>

## Índice de tablas y figuras

Tabla 1. Variables del proceso y resultados .....	7
Figura 1: Ciclo de cocción de piezas cerámicas (4).....	111
Figura 2: Consumo y coste de la energía, respectivamente, en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas. ....	13
Figura 3: Distribución del consumo térmico por etapas (5).....	13
Figura 4: Distribución del consumo eléctrico específico por etapas (8) .....	14
Figura 5: Sistema de cogeneración mediante turbina de gas (9).....	15
Figura 6: Granuladora horizontal Lödige.....	19
Figura 7: Densidad de gránulo en función del tamaño de gránulo (11) .....	24
Tabla 2: Densidad aparente y vibrada de un material granulado y atomizado (12).....	24
Figura 8: Velocidad de flujo en función de la humedad (11) .....	25
Figura 9: Velocidad de flujo en función del tamaño de gránulo (11).....	26
Figura 10: Densidad aparente, densidad vibrada y índice de Hausner en función del tamaño de gránulo (11).....	27
Figura 11: Distribución granulométrica de un gres obtenido por atomización .....	27
Figura 12: Esquema de los componentes de una granuladora Lödige M5R.....	29
Figura 13: Boquilla para pulverizar el agua .....	29
Figura 14: Montaje de la boquilla para pulverizar el aglutinante .....	30
Tabla 3: Composición química arcilla villar .....	31
Tabla 4: Composición mineralógica arcilla villar .....	31
Tabla 5: Propiedades físico-químicas del aglutinante .....	32
Tabla 6: Velocidad de granulación.....	333
Figura 15: Montaje del vibrotamiz .....	35
Figura 16: Máquina de ensayos universal Instron.....	36
Figura 17: Ensayo de fluidez .....	38
Figura 18: Ensayo de compactación de lecho .....	39
Tabla 7: Interpretación del índice de Hausner .....	39
Figura 19: Pruebas iniciales para definir los niveles de las variables .....	40
Figura 20: Comparación vertido directo y pulverizado .....	42
Tabla 8: Niveles de las variables de entrada .....	43
Tabla 9: Matriz del diseño de experimentos .....	44

Tabla 10: Resultados experimentales.....	46
Tabla 11: ANOVA gr3nulos grandes.....	47
Figura 21: Variaci3n de la cantidad de gr3nulos grandes en funci3n de las variables de entrada .....	48
Tabla 12: ANOVA gr3nulos medios.....	49
Tabla 13: ANOVA gr3nulos finos.....	49
Figura 22: Variaci3n de la cantidad de gr3nulos finos en funci3n de las variables de entrada .....	50
Figura 23: Distribuci3n granulom3trica de un gres atomizado.....	51
Figura 24: Comparaci3n distribuci3n granulom3trica.....	53
Figura 25: Evoluci3n de la cantidad de gr3nulos medios .....	54
Figura 26: Comparaci3n distribuci3n granulom3trica con un tiempo de rotura de 3 minutos.....	54
Tabla 14: Resultados del ensayo de velocidad de flujo.....	56
Tabla 15: Determinaci3n del 3ndice de Hausner .....	56
Tabla 16: Muestras para el ensayo de dureza de gr3nulo .....	57
Tabla 17: Valores de la resistencia a la compresi3n.....	58
Figura 27: Vista general de un atomizado y granulado tamizado a 300 micras. ....	58
Figura 28: Vista de detalle atomizado y granulado tamizado a 400 micras.....	59
Figura 29: Secci3n de un gr3nulo atomizado y granulado .....	60
Tabla 18: Presupuesto de inversi3n .....	66
Tabla 19: Gastos fijos anuales .....	66
Tabla 20: Gastos variables anuales.....	67
Tabla 21: Resumen del estudio de viabilidad econ3mica .....	68
Figura 30: Resumen del estudio econ3mico .....	68
Figura 31: Comparativa consumo energ3tico y emisiones de CO <sub>2</sub> .....	71
Figura 32: Comparaci3n distribuci3n 3ptima y distribuci3n obtenida.....	72
Figura 33: Distribuci3n granulom3trica mezcla de 50% tiesto cocido y 50% tiesto crudo .....	76

## 1. Objetivo del proyecto

El consumo energético en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas es muy elevado, siendo el secado por atomización una de las etapas con mayor peso en lo que a energía necesaria se refiere.

La granulación es una técnica que surge como alternativa al secado por atomización y que representa un ahorro energético importante. Con esta técnica, a diferencia del proceso que utiliza el secado por atomización, la preparación de las materias primas se realiza por molienda seca.

Tras esta etapa de molienda las partículas se aglomeran añadiendo un ligante. Para los materiales arcillosos el ligante es agua, en una concentración variable entre el 10-12%.

Actualmente en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, la molienda se realiza vía húmeda, preparando suspensiones acuosas (barbotina) con un contenido en agua del 35%.

Tras esta operación de molienda resulta necesario secar dicha suspensión mediante el proceso de secado por atomización. En este proceso se obtiene un material granulado óptimo para el prensado pero con un consumo energético elevado en el proceso.

El proceso de granulación tras la molienda vía seca es una alternativa más sostenible energéticamente que el proceso actual de atomización tras molienda vía húmeda.

El objeto de este trabajo es estudiar el proceso de granulación, analizando las distintas etapas que intervienen en el mismo y la influencia que tienen las distintas variables del proceso.

De este modo, conocido el efecto que tiene en el proceso cada una de las variables, éste se optimizará con el objetivo de que pueda ser una alternativa viable para implementarlo en la producción de baldosas cerámicas a nivel industrial.



## 2. Alcance

Son muchas las variables que pueden influir en el proceso de granulación, no obstante, este trabajo se centra en el estudio de las variables de funcionamiento del equipo y las características del polvo y el aglutinante utilizados.

Para estudiar la influencia de cada una de las variables en el ensayo de granulación, se realizará un diseño de experimentos. De este modo, a partir del análisis estadístico de los resultados se podrá conocer cómo influye cada una de las variables.

Conocer como interviene cada una de las variables dentro del proceso de granulación permite predecir los resultados a partir de unas determinadas condiciones de las variables del proceso, lo que es fundamental para poder implantarlo a nivel industrial.

En la siguiente tabla se pueden ver cuáles son las variables del proceso que se van a estudiar en este trabajo y las variables de salida que se van a caracterizar, para posteriormente analizarlas utilizando el programa de análisis estadístico R-Studio.

Variables del proceso	Variables de salida
- Humedad de la mezcla polvo-aglutinante	- Distribución granulométrica
- Velocidad de granulación	- Dureza de gránulo
- Tiempo de granulación	- Fluidez y compactación del granulado
- Método de vertido del aglutinante	- Esfericidad de los gránulos

*Tabla 1. Variables del proceso y resultados*

Todos los resultados obtenidos en los ensayos de granulación se compararán con los de una muestra de granulado obtenido mediante la técnica tradicional de molturación por vía húmeda y secado por atomización, ya que ésta es la técnica que se pretende reemplazar.

A través del análisis de los resultados podemos entender los distintos mecanismos que intervienen el proceso de granulación y de esta forma optimizar el proceso al máximo con el objetivo de conseguir unos resultados lo más parecidos posible a los obtenidos mediante el proceso de secado por atomizado.

En este proyecto se incluye además un estudio económico para determinar la viabilidad de implementar el proceso de granulación dentro de la cadena de producción de baldosas cerámicas a nivel industrial.



### 3. Antecedentes

Desde el punto de vista energético, las técnicas utilizadas actualmente en la fabricación de baldosas cerámicas están muy optimizadas, por lo que resulta muy complicado conseguir un ahorro energético importante.

En este aspecto, se está tratando de aprovechar al máximo la energía térmica generada en cada etapa, reutilizándola en etapas posteriores del proceso de producción mediante intercambiadores de calor.

La única alternativa para conseguir ese ahorro energético sustancial implica algún cambio tecnológico importante. Es necesario reemplazar las técnicas tradicionales por otras que necesiten de un aporte energético menor.

Es justamente en este sentido donde se entiende el papel del proceso de granulación como alternativa de ahorro energético dentro del proceso de fabricación de baldosas cerámicas.

#### 3.1. Proceso de fabricación de baldosas cerámicas

La fabricación de baldosas cerámicas es un proceso que consta de varias etapas sucesivas mediante las cuales se transforman las materias primas en las baldosas ya acabadas y embaladas.

Las principales etapas del proceso son las siguientes:

- Preparación del material granulado
- Conformado de la pieza
- Secado
- Esmaltado
- Cocción
- Clasificación y embalado

##### **Preparación del material granulado**

La preparación del material granulado para el conformado de las baldosas cerámicas por prensado es un proceso que consta de varias etapas:

- La primera etapa del proceso de fabricación de baldosas cerámicas es la preparación de las materias primas. Esta etapa comienza seleccionando las materias primas que formarán las baldosas. Generalmente estas materias primas son arcillas, feldespatos, arenas, carbonatos y caolines (1).

- Posteriormente se realiza el **proceso de molturación** para conseguir una mezcla homogénea a partir de las materias primas seleccionadas. La molturación puede realizarse de dos formas: por vía húmeda o por vía seca.

La molturación por **vía húmeda** es la más habitual. Las materias primas se mezclan en un molino de bolas y se diluyen en agua para formar una suspensión denominada barbotina.

Esta suspensión tiene un humedad que oscila entre 0,30-0,45 kilogramos de agua por kilogramo de sólido seco y tiene que reducirse hasta una humedad de 0,05-0,07 kilogramos de agua por kilogramo de sólido seco para poder realizar el prensado de las baldosas de forma correcta (2).

La eliminación del exceso de agua se realiza en el proceso de secado por atomización. Con este proceso, además de reducir la humedad, también se granula el material y se consigue un granulado con unas características físicas favorables para la posterior etapa de prensado.

En la molturación por **vía seca**, las materias primas se molturan en molinos pendulares sin añadir agua.

Posteriormente puede realizarse el prensado directamente o bien granular el material. En este proceso se añade la cantidad justa de agua para conseguir las características del material deseadas para el conformado de la baldosas por prensado. De esta forma se ahorra mucha agua y la consiguiente energía térmica necesaria para reducir la humedad del material en el secado.

### **Conformado de la pieza**

El conformado de las baldosas cerámicas se realiza normalmente por prensado en seco. Como se ha dicho anteriormente, la humedad del material tiene que encontrarse entre el 5% y el 7%.

Para formar la pieza, el material se comprime en un molde mediante una prensa hidráulica. La presión a la que se somete el material suele ser de unos 250 kg/cm<sup>2</sup> (3).

### **Secado**

Con el secado se reduce la humedad de las piezas hasta valores entre el 0,2-0,5% (2). Esta reducción de la humedad es necesaria para poder realizar las etapas de cocción y esmaltado de forma adecuada.

El secado se realiza en secaderos donde las piezas se someten a un corriente de gases a elevadas temperaturas. De este modo, el mecanismo de transmisión de calor que predomina en el secado es la convección.

El secado de las piezas se realiza lentamente para evitar que se pueda producir un agrietamiento de las mismas.

### Esmaltado

La etapa de esmaltado es opcional y confiere a la pieza una serie de características técnicas y estéticas como puede ser impermeabilidad, brillo o resistencia química.

Para esmaltar las piezas, éstas se recubren con varias capas de esmalte, el cual se obtiene a partir de una mezcla de materias primas inorgánicas. Su componente principal es la sílice, que le confiere el carácter vítreo.

El esmaltado es un proceso que se realiza generalmente de forma continua. Las baldosas ya secadas circulan por una cinta transportadora y pasan por debajo de una cascada de esmalte que recubre las piezas.

### Cocción

La etapa de cocción tiene gran influencia en las propiedades físicas que tendrá el producto acabado, por lo que se trata de una etapa de gran importancia.

Esta etapa consiste en aplicar un ciclo térmico a las piezas. Las baldosas se someten a distintas temperaturas durante periodos de tiempo concretos. Este ciclo térmico consta de tres etapas diferenciadas: precalentamiento, cocción y enfriamiento.

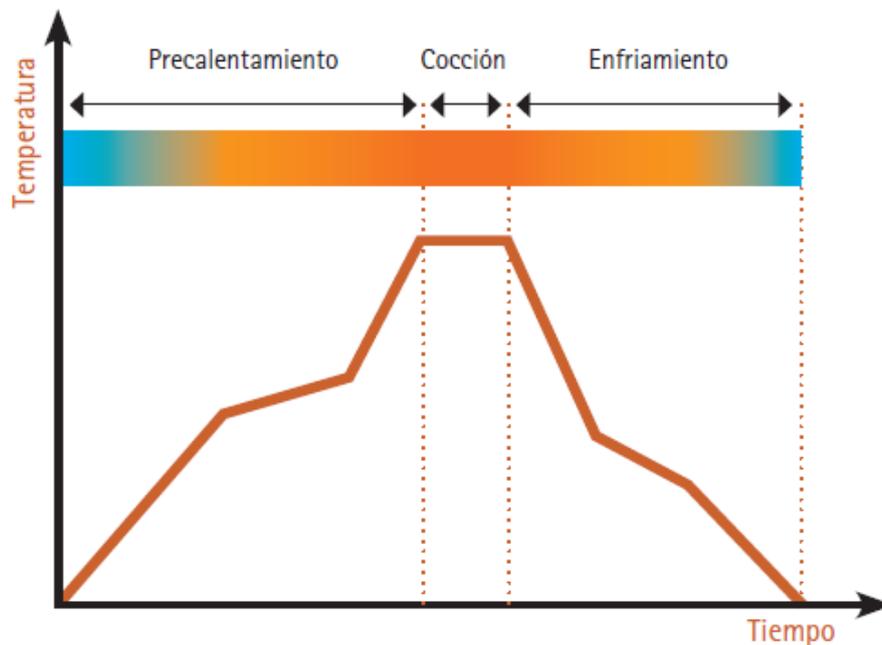


Figura 1: Ciclo de cocción de piezas cerámicas (4)

El método de cocción más utilizado actualmente es la cocción rápida en hornos monoestrato de rodillo. En estos hornos las piezas avanzan por el horno por encima de los rodillos. El calor necesario se aporta a las piezas a través de gas caliente que se genera en las paredes del horno.

### **Clasificación y embalado**

Esta es la última etapa del proceso y en este punto las baldosas cerámicas ya están acabadas.

A través de sistemas automatizados se realiza la clasificación de las piezas. Estos sistemas se basan en un software de reconocimiento y son capaces de detectar las piezas defectuosas a partir de una serie de parámetros prefijados.

Las baldosas que superan este reconocimiento están listas para ser embaladas.

## **3.2. Situación energética del sector**

En el punto anterior se han comentado brevemente las distintas etapas del proceso de fabricación de baldosas cerámicas.

En este punto se va a analizar el aspecto energético para determinar cuáles son las etapas que consumen una mayor cantidad de energía dentro del proceso.

Se estudiarán la eficiencia de las técnicas utilizadas en cada una de las etapas y las posibles alternativas para mejorar el rendimiento energético del proceso.

### **3.2.1. Consumo energético**

La fabricación de baldosas cerámicas es un proceso industrial que requiere grandes cantidades de energía.

El gasto energético tiene lugar en forma de energía térmica y energía eléctrica, siendo la energía térmica la más importante. Así, en el año 2012 el consumo de energía térmica en el sector español de baldosas cerámicas fue del 88%, mientras que el 12% restante fue el consumo en energía eléctrica (5).

A pesar de que el consumo en energía térmica es mucho superior al de energía eléctrica, la diferencia de costes no es tan dispar debido al mayor coste de la energía eléctrica frente a la energía térmica producida con gas natural.

En el año 2008 el consumo energético térmico supuso el 90% y el eléctrico el 10%, mientras que el coste de la energía representó el 75% y 25% respectivamente (6).

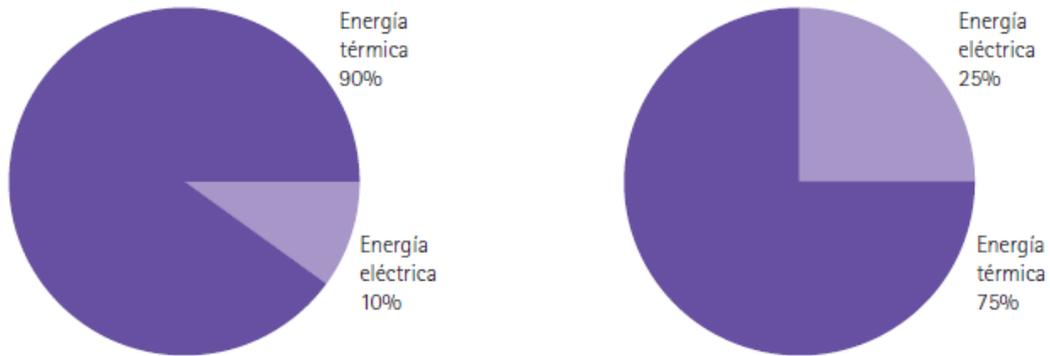


Figura 2: Consumo y coste de la energía, respectivamente, en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas (6).

### Consumo de energía térmica

Como se ha comentado anteriormente, el mayor consumo de energía se produce en forma de energía térmica.

Este consumo de energía térmica se produce prácticamente en su totalidad en tres etapas concretas del proceso de producción: el **secado por atomización**, el secado que tiene lugar después de la etapa de conformado por prensado y la cocción, siendo esta última la etapa la más importante.

Los porcentajes del consumo que representan estas tres etapas son el 55% en la etapa de cocción, **el 36% en el secado por atomización** y el 9% en el secado. En la siguiente gráfica se representan esta distribución de consumos (5).

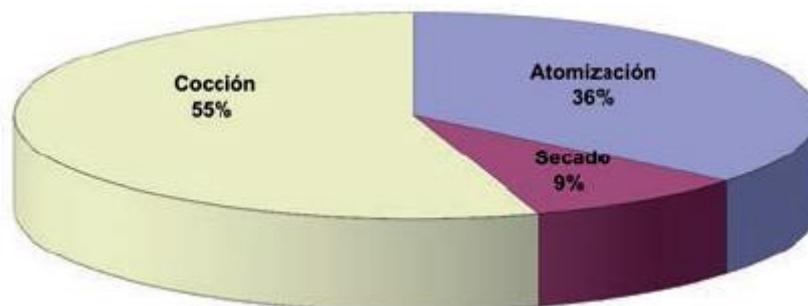


Figura 3: Distribución del consumo térmico por etapas (5)

El combustible empleado para generar esta energía térmica es el gas natural. Anteriormente a la utilización del gas natural, los combustibles más utilizados eran el fuelóleo y el gasóleo con los que se conseguía un rendimiento térmico mucho inferior.

La llegada del gas natural a las industrias productoras de baldosas cerámicas supuso una revolución, ya que a partir de ese momento los hornos tipo túnel que se utilizaban anteriormente fueron sustituidos por los hornos monoestrato de rodillo con los que se consigue un aprovechamiento de la energía superior.

No obstante, el incremento del precio del gas natural en los últimos años está encareciendo cada vez más el coste de la energía térmica. El precio del gas natural subió un 48% entre 2005 y 2013, pasando de los 0,034329 euros/kWh en 2005 a los 0,05078971 euros/kWh en 2013 (7)

Por ello, las alternativas de eficiencia energética a la atomización como el proceso de granulación cada vez cogen más fuerza.

### Consumo de energía eléctrica

Hemos visto que el consumo eléctrico apenas representa alrededor del 10% del consumo energético total, sin embargo supone alrededor del 25% del coste energético.

En una planta de fabricación de baldosas cerámicas, tanto las etapas del proceso de fabricación como otros servicios relacionados con la planta industrial necesitan de cierta energía eléctrica para funcionar.

En la siguiente tabla se muestra la distribución del consumo eléctrico específico por etapas:

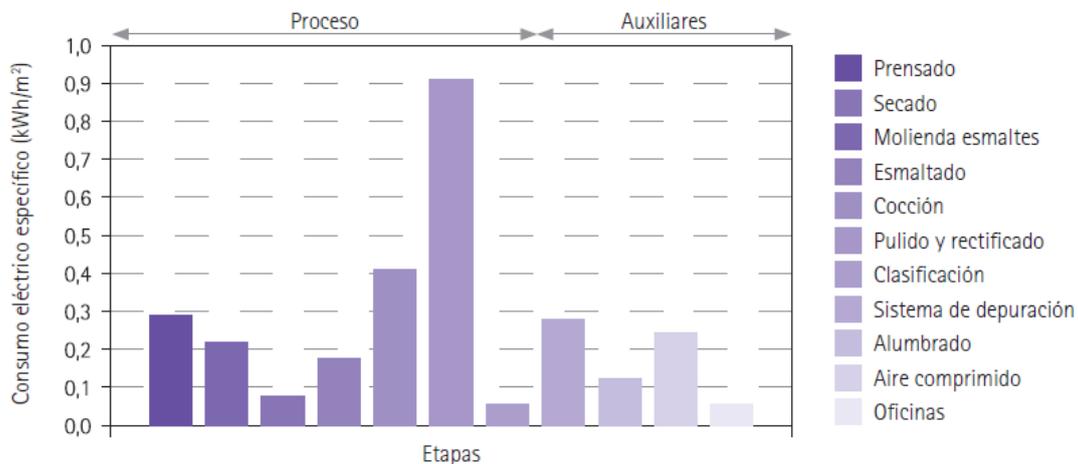


Figura 4: Distribución del consumo eléctrico específico por etapas (8)

### 3.2.2. Cogeneración

Se ha comentado anteriormente que la sustitución del gasoil por el gas natural para la producción de energía térmica ha sido un cambio muy importante en el sector. Otro cambio que significó una revolución en el aspecto del consumo energético es la utilización de sistemas de cogeneración.

La cogeneración es un proceso en el que se genera de forma simultánea energía térmica y energía eléctrica. De esta forma se consigue un mayor aprovechamiento de la energía química que tiene el combustible utilizado, normalmente gas natural, y se consiguen rendimientos que alcanzan el 85% (4).

El sistema de cogeneración más utilizado en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas es la turbina de vapor. Los gases de escape resultantes de la combustión del gas natural se utilizan como energía térmica en la etapa de secado por atomización, mientras que la energía eléctrica generada permite abastecer las necesidades de las distintas etapas del proceso de producción.

A continuación se muestra un esquema de cómo funciona un sistema de cogeneración mediante turbina de gas implementado en el proceso de producción de baldosas cerámicas.

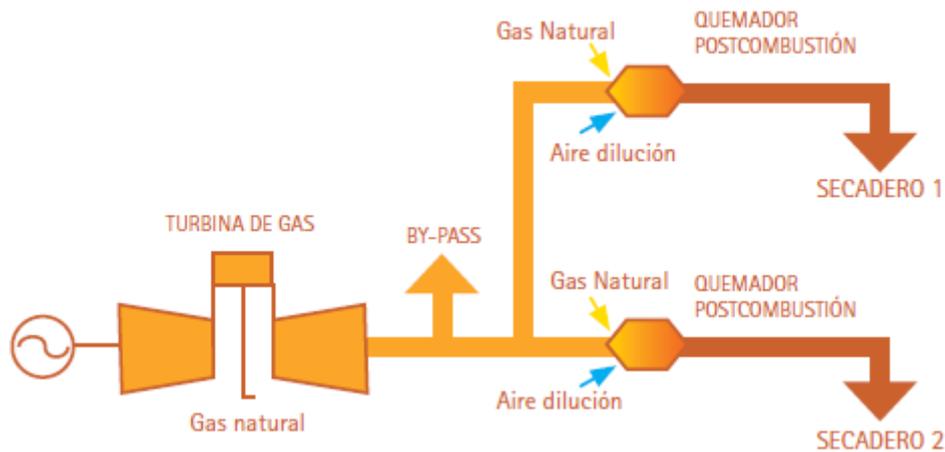


Figura 5: Sistema de cogeneración mediante turbina de gas (9)

### 3.2.3. Medidas de ahorro energético

El incremento del precio de la electricidad y del gas que se ha producido en España en los últimos años, la regulación de los sistemas de cogeneración que eliminan las primas a este tipo de energía y el endurecimiento de la política medioambiental en lo que se refiere a las emisiones de dióxido de carbono hacen que sea necesario adoptar nuevas medidas de ahorro energético para favorecer el crecimiento del sector.

Las técnicas que se están utilizando actualmente en el sector de baldosas cerámicas llevan años implementadas y están muy optimizadas, por lo que resulta complicado conseguir mejorarlas y lograr un ahorro energético sustancial.

En este sentido, la mayoría de las medidas en las que se está trabajando están enfocadas en obtener un mayor rendimiento de la energía térmica generada, mediante sistemas de recuperación de calor y mejoras en los equipos y sistemas utilizados para optimizar sus consumos.

Por lo que se refiere a los sistemas de recuperación de calor, una de las técnicas más utilizadas es la recirculación en secaderos. Esta técnica consiste en recircular una parte de los gases de escape de los secaderos para mezclarlos en la entrada del mismo con los gases de entrada previamente calentados.

Otra forma de recuperación de calor es utilizar los gases calientes que salen de los hornos como gases de entrada de los secaderos.

Para conseguir un ahorro energético importante es necesario tomar medidas que supongan un cambio drástico en las tecnologías y procesos utilizados.

En este sentido, el proceso de preparación de las materias primas mediante molturación por vía húmeda y secado por atomización, utilizado de forma generalizada en la actualidad, puede ser sustituido por un proceso de molturación por vía seca y posteriormente un proceso de granulación.

Mediante la implementación de este proceso puede conseguirse un ahorro en el consumo de agua y de energía térmica del 70% en la etapa de preparación del material cerámico para el prensado (10).

En los siguientes apartados de este trabajo se estudiará el proceso de granulación para poder entender las variables que intervienen en el proceso y cuál es la influencia de cada una de ellas. A partir del conocimiento de los mecanismos que intervienen en la granulación se podrá optimizar el proceso para tratar de conseguir unos resultados equiparables a los que se obtienen con la técnica de secado por atomización, y de esta forma garantizar su viabilidad.

### **3.3. Proceso de granulación**

#### **3.3.1. Definición del proceso**

La granulación es un proceso de aglomeración en el que las partículas iniciales de polvo se unen entre si formando partículas más grandes denominadas gránulos.

Aunque existen distintas técnicas para realizar la granulación de un material, en el ámbito de la producción de baldosas cerámicas la técnica utilizada es la granulación vía húmeda.

En la granulación húmeda se añade una cierta cantidad de líquido aglutinante al polvo y se mezclan utilizando una granuladora de alta cizalla. Fundamentalmente, la granuladora se encarga de agitar la mezcla para que las partículas de polvo y el aglutinante se mezclen y empiecen a desarrollarse los distintos mecanismo que se producen durante el proceso de granulación.

#### **3.3.2. Etapas del proceso de granulación**

Se puede entender el proceso de granulación como la combinación de tres mecanismos que se desarrollan mientras el polvo y el aglutinante están siendo agitados en la granuladora:

- Nucleación
- Crecimiento
- Rotura

#### **3.3.2.1. Nucleación**

La nucleación es el proceso por el cual el líquido aglutinante se distribuye y entra en contacto con las partículas de polvo de una forma determinada.

Este mecanismo es complicado de analizar y hay poca información al respecto ya que en muchos casos se ha considerado como un mecanismo dentro del proceso de crecimiento de gránulo.

Una distribución homogénea del líquido y las partículas de polvo es un indicativo de una nucleación correcta y que posteriormente se verá reflejada en la distribución de tamaños de los gránulos resultantes.

Para analizar el mecanismo de nucleación, el aspecto más relevante a tener en cuenta es la zona de nucleación, que es el área donde el líquido aglutinante y el polvo entran en contacto.

A través del estudio de la zona de nucleación se puede entender mejor el funcionamiento del mecanismo de nucleación.

En el caso de que el líquido se añada pulverizado, las variables que más influyen en este proceso son el tamaño de la zona de nucleación, el flujo de las partículas de polvo y el caudal del líquido aglutinante.

En la realización de los ensayos de granulación se han utilizado dos métodos de vertido diferentes del aglutinante, el vertido directo y el pulverizado, con el objetivo de analizar la influencia sobre la etapa de nucleación.

#### **3.3.2.2. Crecimiento de gránulo**

El crecimiento de gránulo se produce cuando el material, que está agitándose dentro de la granuladora, colisiona y se queda unido. De este modo, las partículas chocan entre ellas y van uniéndose formando partículas mayores.

El crecimiento de gránulo se produce mientras se está añadiendo el aglutinante y también una vez el líquido ya se ha añadido completamente, al tiempo que las partículas van colisionando.

El hecho de que cuando dos partículas colisionan entre si se produzca una unión depende de las propiedades de los gránulos y del aglutinante.

A medida que se van formando los gránulos y estos continúan colisionando con otros, los gránulos experimentan un proceso de consolidación. En este proceso de

consolidación, la porosidad del gránulo se reduce, eliminando el aire y el líquido que pudiera existir en su interior, de manera que la resistencia del gránulo aumenta.

Este aspecto es importante, porque si la resistencia de los gránulos es pequeña estos tenderán a romperse y generar polvo, lo cual no es deseable para la mayoría de las aplicaciones. La resistencia de los gránulos tiene también un valor crítico máximo, ya que de ser demasiado elevada podría afectar negativamente al proceso de prensado de las baldosas.

#### **3.3.2.3. Rotura**

La rotura de los gránulos es un proceso del cual dependerá en gran medida la distribución final de tamaños de los gránulos.

Consiguiendo controlar del proceso de rotura de los gránulos se puede limitar el tamaño máximo para así poder conseguir la distribución de tamaños deseada.

Se pueden diferenciar dos tipos distintos de mecanismos de rotura de los gránulos:

- Rotura de gránulos húmedos para formar gránulos más pequeños
- Desgaste de gránulos secos para formar polvo

Aunque es complicado predecir el mecanismo de rotura ya que intervienen muchos factores, los ensayos muestran que una mayor velocidad de rotación produce gránulos de menor tamaño, pues se incrementa este mecanismo de rotura.

### **3.4. Tipos de granuladoras**

Existen distintos tipos de granuladoras según el método de granulación y, dependiendo de las necesidades de cada sector industrial, se utiliza la más conveniente. Estos son los principales tipos de granuladoras:

- Granuladora de lecho fluidizado
- Granuladora de alta cizalla
- Granuladora de tambor
- Granuladora de disco
- Granuladora centrífuga

Para la preparación del material granulado para el conformado de baldosas cerámicas se utilizan las granuladoras de alta cizalla.

Una granuladora de alta cizalla es un dispositivo que genera un movimiento rotatorio de una cuchilla para mezclar materiales en polvo dentro de la cubeta de granulación. Generalmente este movimiento rotatorio se genera a partir de un motor eléctrico, de forma que el rotor del motor es el encargado de hacer girar la cuchilla.

Las granuladoras disponen de algún tipo de mecanismo para poder añadir el fluido aglutinante mientras la cuchilla está agitando el polvo.

Dispone también de una serie de elementos de mando para poder controlar el funcionamiento del equipo, como pueden ser un regulador de la velocidad, un temporizador para regular el tiempo de granulación o el botón de puesta en marcha y parada.

Dentro de las granuladoras de alta cizalla podemos diferenciar dos tipos distintos:

- Granuladora de alta cizalla vertical
- Granuladora de alta cizalla horizontal

La diferencia entre estos dos tipos de granuladoras se encuentra en el eje de rotación de la cuchilla. En la granuladora vertical el eje de rotación de la cuchilla está en posición vertical, perpendicular al suelo, mientras que en la granuladora horizontal el eje de rotación es paralelo al suelo.

Para realizar los ensayos de granulación que aparecen en este trabajo se ha utilizado una granuladora horizontal Lödige M5R (en el apartado 4.1. *Equipo y herramientas* hay una explicación más detallada de las características y funcionamiento de esta granuladora).



*Figura 6: Granuladora horizontal Lödige*

### **3.5. Preparación del polvo**

La preparación del polvo para la posterior etapa de granulación se realiza mediante la técnica de molturación por vía seca.

Mediante la molturación se consigue reducir el tamaño de las partículas del material base, normalmente una arcilla, hasta conseguir un polvo de un determinado tamaño de partícula.

Las etapas del proceso de molturación por vía seca utilizadas para preparar el polvo utilizado en el proceso de granulación son las siguientes:

### **Trituración**

Esta es la primera etapa del proceso de molturación y en ella se consigue reducir el material a un tamaño entre 1-5 centímetros utilizando una trituradora de mandíbula. Este tipo de trituradora se utiliza para trituración media y gruesa y se caracteriza por el alto rendimiento y ahorro energético.

### **Molienda primaria**

En esta segunda etapa se utilizan molinos de martillo para reducir el tamaño del material hasta los 5 milímetros. Con esta primera fase de molienda se consigue adecuar al tamaño del material para la etapa de molienda secundaria.

### **Molienda secundaria**

En esta segunda etapa de molienda se consigue un tamaño de partícula inferior a las 100 micras. Esta etapa se realiza utilizando molinos pendulares, los cuales disponen de un clasificador capaz de extraer las partículas de menor tamaño, de forma que las partículas más grandes continúan dentro de la máquina hasta que alcanzan el tamaño deseado.

En el caso del material molturado utilizado en la parte de experimentación de este trabajo, el tamaño de partícula obtenido en el proceso de molturación es inferior a 60 micras.

## **3.6. Aglutinantes**

La cantidad de aglutinante y la viscosidad del mismo son dos factores que tienen mucha influencia en el proceso de granulación.

Dependiendo del tipo y cantidad de aglutinante que se utilice en el proceso de granulación, se obtendrán unas propiedades distintas en el material granulado. Las características del aglutinante influirán en los distintos mecanismos de consolidación de los gránulos, y esto determinará propiedades como la distribución final de tamaños, la porosidad y la resistencia de los gránulos, entre otras.

Predecir la influencia que tendrá un determinado aglutinante no resulta sencillo, ya que los resultados dependen tanto de las propiedades y cantidad del aglutinante,

como de las propiedades del polvo y las condiciones de funcionamiento del equipo de granulación.

Por lo tanto, para poder hacer una predicción de cuáles serán los resultados obtenidos en la granulación de un material utilizando un aglutinante en concreto, lo más conveniente es basarse en los resultados obtenidos en ensayos utilizando el mismo material y aglutinante.

A pesar de la complejidad para entender el efecto del aglutinante, se puede decir que, generalmente, una mayor concentración de líquido aglutinante provoca una disminución de partículas finas en el material granulado.

### **Tipos de aglutinantes**

Se utilizan distintos tipos de aglutinantes para llevar a cabo el proceso de granulación. Las propiedades más influyentes de estos aglutinantes en el proceso de granulación son la concentración, la viscosidad y la tensión superficial.

El agua es un ejemplo de aglutinante de baja viscosidad que se utiliza mucho en los ensayos de granulación. Otro tipo de aglutinante es el glicerol, el cual se caracteriza por su elevada viscosidad.

También se utilizan soluciones acuosas de alcoholes como el alcohol de polivinilo.

Para la granulación de arcillas, como es el caso de los ensayos realizados en este trabajo, se utiliza agua como aglutinante.

### **Método de vertido**

Cómo se ha comentado anteriormente en el apartado 3.3.2.1. *Nucleación*, el método con el que se realiza el vertido del aglutinante tiene una influencia relevante en el proceso de granulación, especialmente en la etapa inicial de nucleación.

En este sentido, el aglutinante se puede añadir al polvo de dos formas: por vertido directo o por pulverización.

Si el aglutinante se añade por vertido directo el único factor que hay que controlar es la cantidad de aglutinante que se ha añadido, para saber la relación sólido-líquido con la que se va a realizar la granulación.

En cambio, si el aglutinante se añade por pulverizado hay otros factores aparte de la cantidad de aglutinante que hay que controlar.

Así, hay que tener en cuenta, por una parte, el tiempo que se tarda en pulverizar todo el líquido, y por otra parte, cual es la altura de la boquilla con la que se realiza la

pulverización, ya que ello determinará el tamaño de la zona donde cae el aglutinante pulverizado.

### 3.7. Características del material granulado para el prensado

El prensado es la etapa en que se conforman las baldosas cerámicas utilizando una prensa para compactar el material granulado.

El prensado está precedido por toda la etapa de preparación del material granulado. La etapa de prensado tiene dos objetivos principales:

- **Conformado de las baldosas cerámicas:** se obtienen baldosas con unas dimensiones y una geometría determinadas, evitando que aparezca cualquier tipo de defecto en la pieza.
- **Obtención de una microestructura adecuada en las baldosas:** es fundamental para poder realizar correctamente las siguientes etapas del proceso de fabricación y para poder conseguir un producto acabado que tenga las características deseadas.

Para que se cumplan estos objetivos principales de la etapa de prensado, son dos los factores que hay que controlar:

- Las características del material granulado
- Las características del ciclo de prensado

A continuación se analiza más en profundidad las características que debe de tener el material granulado para poder realizar el prensado de las baldosas cerámicas con unas condiciones óptimas.

Las principales propiedades del material granulado que hay que tener en cuenta para la etapa de prensado son las siguientes:

- **Densidad aparente:** hace referencia al peso por unidad de volumen del material granulado, en el que se incluye la fase sólida, la porosidad de los gránulos y los huecos que aparecen entre los gránulos.
- **Fluidez:** esta propiedad está relacionada con la movilidad que tienen las partículas del material granulado entre sí.

Estas propiedades están condicionadas por características del material granulado como la forma de las partículas, la distribución de tamaños o la humedad del material.

#### Densidad aparente

En relación a la densidad aparente del material hay que tener en cuenta dos aspectos que son determinantes para realizar el prensado:

- Por una parte, es necesario que la densidad aparente del material sea uniforme para evitar que aparezcan en las baldosas los defectos que se han citado anteriormente.
- Por otra parte, la densidad aparente tiene que tener unos valores adecuados. Una densidad aparente muy baja significa que existe una gran cantidad de aire contenido en el material y que debe ser expulsado, lo cual puede inducir a complicaciones durante el prensado.

Una densidad aparente demasiado elevada puede requerir de mayores cargas para el prensado, provocando un mayor desgaste de los elementos de la prensa y reduciendo su vida útil.

La densidad aparente depende de la densidad de los gránulos y del volumen de huecos intergranulares. La densidad aparente se mide pesando el material en una probeta de volumen conocido. No hay que agitar el material para que éste no se compacte.

La densidad de los gránulos depende fundamentalmente de cual sea su porosidad. Esta porosidad será diferente dependiendo de cuál haya sido el proceso utilizado para obtener el material granulado.

De este modo, si el material granulado se ha obtenido con el proceso de secado por atomización, la densidad de los gránulos será considerablemente inferior que si se han obtenido por el método de molturación vía seca y posterior granulación.

Esto se debe a que los gránulos obtenidos por atomización presentan cráteres internos que hacen que sean huecos, mientras que los que se obtienen por granulación se forman por aglomeración de partículas más pequeñas y no presentan estos huecos internos.

En la siguiente figura se puede ver una comparación de la densidad de los gránulos obtenidos por atomización y por granulación en función de su tamaño.

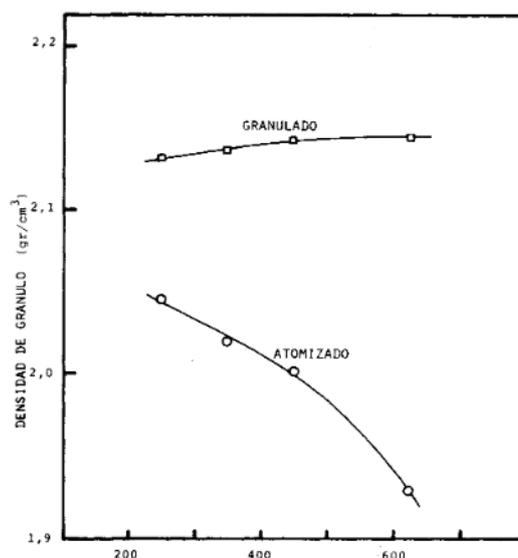


Figura 7: Densidad de gránulo en función del tamaño de gránulo (11)

El volumen de huecos intergranulares depende principalmente del tamaño de los gránulos y de la forma de los mismos. En la siguiente tabla se muestran valores típicos de la densidad aparente de un material granulado obtenido por atomización y otro por granulación.

	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad vibrada (g/cm <sup>3</sup> )
Granulado	1,113	1,472
Atomizado	1,005	1,244

Tabla 2: Densidad aparente y vibrada de un material granulado y atomizado (12)

Se observa en la tabla 2 que la densidad aparente del material obtenido por granulación es ligeramente superior al obtenido por atomización.

La densidad vibrada hace referencia a la densidad del material cuando este se compacta mediante la aplicación de una fuerza que agita los gránulos. Esta característica se utilizará a continuación para estudiar la fluidez del material granulado.

### Fluidez

La importancia de la fluidez del material granulado reside en el correcto llenado del molde de prensado.

Una buena fluidez permite llenar completamente el molde y de esta manera la fuerza que ejerce la prensa se distribuye uniformemente a lo largo de toda la superficie que conforma la baldosa.

La combinación de esta carga uniformemente distribuida junto con una densidad aparente uniforme en todo el material es lo que permite obtener baldosas cerámicas libres de defectos y con las propiedades deseadas.

Además de facilitar el llenado del molde, una elevada fluidez permite también trabajar con ciclos de producción elevados, lo que es importante para mejorar la productividad y la viabilidad económica del proceso.

Para estudiar la fluidez del material granulado se utilizan dos métodos: la velocidad de flujo y el índice de Hausner.

La velocidad de flujo mide la cantidad de masa por unidad de tiempo que pasa a través de un embudo con un orificio calibrado.

El índice de Hausner mide el cambio de densidad que se produce en un material granulado cuando este se compacta mediante una fuerza de agitación. El índice de Hausner se calcula como la relación entre la densidad vibrada y la densidad aparente. Cuanto menor sea la fluidez del material, mayor será el cambio de densidad que se producirá y, por lo tanto, mayor será el índice de Hausner.

En el apartado 4.4.2. *Ensayos de caracterización* de este trabajo, se explica en detalle el procedimiento que se sigue para realizar estos dos ensayos de fluidez.

Las características del polvo granulado que afectan a la fluidez son la humedad, la distribución de tamaños de gránulo y la esfericidad de los gránulos.

Una mayor esfericidad de las partículas se traduce en una mejor fluidez del material.

Un incremento de la humedad del material repercute en una disminución de la fluidez, como se puede observar en la Figura 8, donde se representa la velocidad de flujo de un polvo atomizado en función de la humedad.

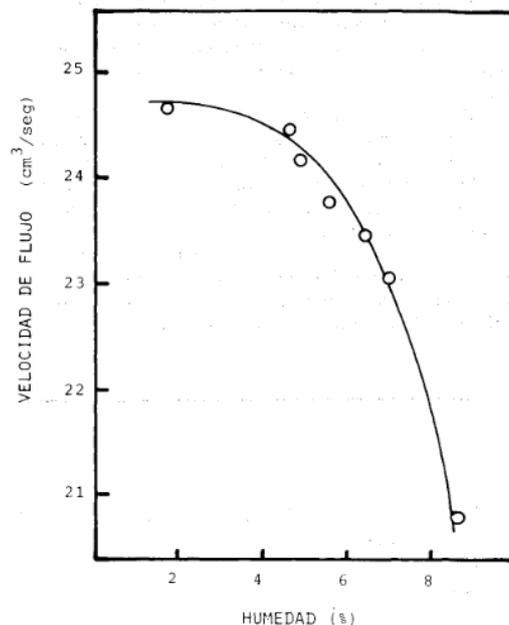


Figura 8: Velocidad de flujo en función de la humedad (11)

En la figura 9 se representa cómo influye el tamaño de gránulo en la velocidad de flujo. Se puede observar que tanto para el material obtenido por atomización como para el obtenido por granulación los gránulos más finos tienen una fluidez muy baja.

Para el polvo atomizado el tamaño de gránulo que optimiza la fluidez del material se sitúa entre 150 y 400 micras, mientras que para el polvo granulado el tamaño que optimiza la fluidez está entre 200 y 500 micras.

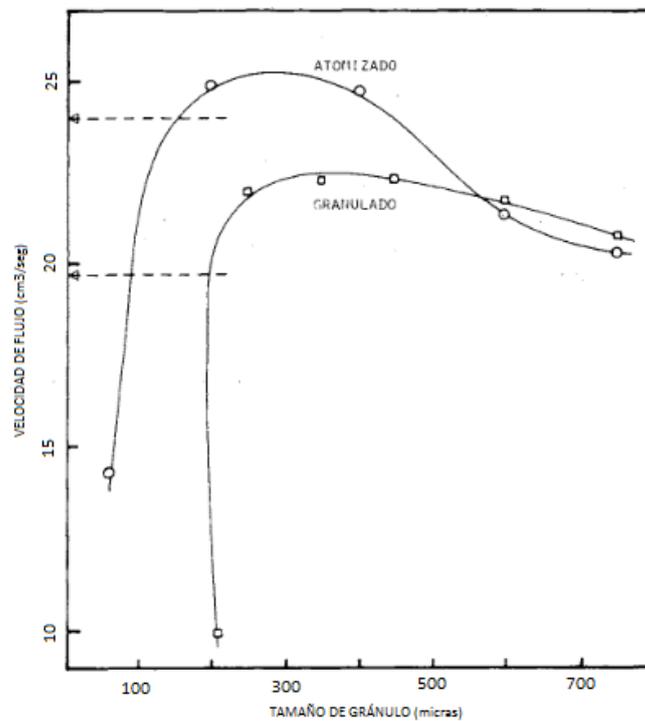


Figura 9: Velocidad de flujo en función del tamaño de gránulo (11)

En la figura 10 se representa la densidad aparente, la densidad vibrada y el índice de Hausner en función del tamaño de gránulo.

El rango de tamaños de partícula que minimiza el valor del índice de Hausner, y que por lo tanto maximiza la fluidez del polvo granulado, corresponde con los rangos óptimos del ensayo de velocidad de flujo (150-400 micras para el atomizado y 200-500 micras para el granulado).

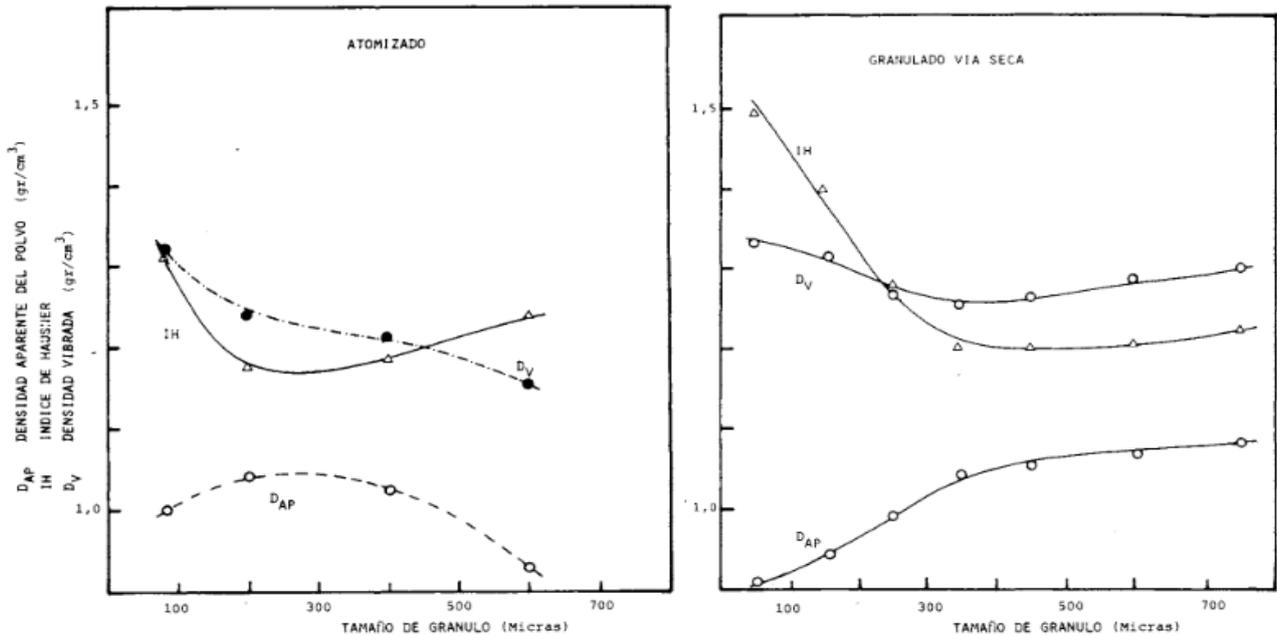


Figura 10: Densidad aparente, densidad vibrada y índice de Hausner en función del tamaño de gránulo (11)

A partir de estas propiedades del material granulado se puede concluir que la distribución de tamaños óptima para el prensado de baldosas cerámicas, utilizando un polvo molturado vía seca y posteriormente granulado, es aquella en que se maximice la fracción de gránulos con un tamaño entre 200 y 500 micrómetros.

De este modo, la distribución granulométrica objetivo que se tiene que tratar de conseguir a través del estudio y optimización del proceso de granulación que se va a realizar a lo largo de este trabajo, tiene que asemejarse a la distribución típica obtenida mediante el proceso de secado por atomización y ligeramente desplazada a la derecha.

En la siguiente figura se muestra la distribución de tamaños de un granulado obtenido mediante secado por atomización.

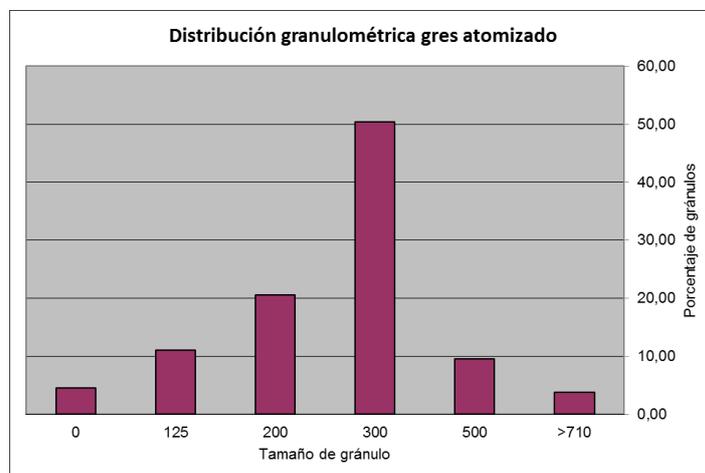


Figura 11: Distribución granulométrica de un gres obtenido por atomización



## 4. Experimentación

### 4.1. Equipo y herramientas

Para la realización de los ensayos de granulación y la posterior medición de los resultados se han utilizado los siguientes equipos.

El equipo principal es la granuladora de alta cizalla Lödige M5R con una capacidad máxima de 5 litros.

En la siguiente imagen se puede ver un esquema de los componentes de la granuladora dentro de la cubeta de granulación donde se coloca el polvo y el agua:

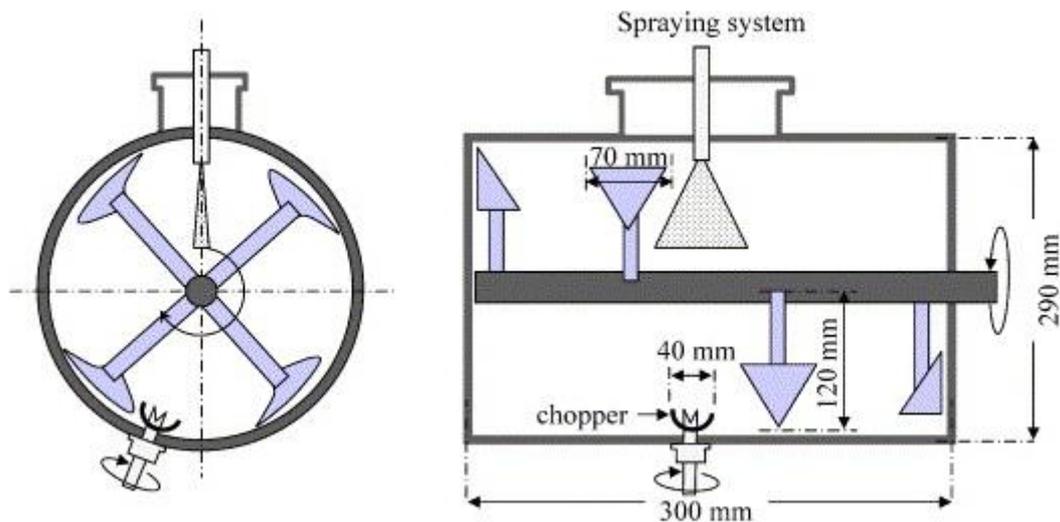


Figura 12: Esquema de los componentes de una granuladora Lödige M5R

Para poder realizar el vertido del aglutinante se ha montado una boquilla para pulverizar el líquido.



Figura 13: Boquilla para pulverizar el agua

La boquilla está conectada por una parte a una salida de aire a presión mientras que en la otra se coloca una jeringuilla con la que se inyecta el fluido de forma manual. Con la jeringuilla se mide la cantidad de líquido vertido y utilizando un cronómetro se controla la velocidad a la que se añade el fluido a la mezcla.



*Figura 14: Montaje de la boquilla para pulverizar el aglutinante*

Además del equipo utilizado para granular el material, se utilizan los siguientes equipos para medir y analizar los resultados:

- **Báscula electrónica:** se utiliza fundamentalmente para pesar el material antes de introducirlo en la granuladora y para realizar la distribución granulométrica una vez el material ya se ha granulado y tamizado.
- **Vibrotamiz:** es un dispositivo que consta de una base que permite generar una vibración controlada y sobre la cual se monta una torre con los tamices de los tamaños deseados para realizar la distribución granulométrica del material. La potencia de la vibración y el tiempo se pueden ajustar fácilmente desde el cuadro de control del equipo.
- **Estufa de secado:** en los ensayos realizados, el material granulado tiene una humedad que oscila entre el 12% y el 15%. Con esos valores de humedad no se pueden realizar algunos de los ensayos de caracterización de las muestras, como por ejemplo la distribución granulométrica, y es necesario reducir la humedad. Para realizar la distribución granulométrica el material debe estar a una humedad inferior al 0,5% para evitar aglomerados del producto.
- **Balanza infrarrojos:** este equipo se utiliza para medir la humedad de las muestras de material granulado. Su funcionamiento se basa en la pérdida de

masa que experimenta la muestra cuando se evapora el agua que contiene. La medición dura 10 minutos y el calor se aporta por radiación infrarroja.

- **Microscopio:** para visualizar la forma de los gránulos se utiliza un microscopio. El microscopio está conectado a un ordenador y lleva acoplada una cámara para visualizar las imágenes. Mediante un programa se mejora el enfoque y se coloca la escala a las imágenes tomadas.
- **Máquina de ensayos universal Instron:** este equipo se utiliza para medir la dureza de los gránulos. Para ello se realiza un ensayo de resistencia a la compresión con el que se aplasta un gránulo y se registra la fuerza ejercida por este. En la sección 4.4.2. *Ensayos de caracterización* de este trabajo hay una explicación más detallada del funcionamiento de este equipo.

## 4.2. Material y aglutinante

Las propiedades del material y el aglutinante utilizados en el ensayo de granulación influyen de forma decisiva en los resultados obtenidos.

El material con el que se trabaja es una arcilla villar. El polvo para realizar la granulación se obtiene por el método de la molienda por vía seca, utilizando el procedimiento que ya ha sido detallado anteriormente en la sección 3.5. *Preparación del polvo*.

La humedad de la arcilla ya molturada es del 2%. Esta humedad inicial se ha tenido en cuenta al añadir el aglutinante durante el ensayo de granulación para obtener la humedad total deseada.

En la siguiente tabla se muestra la composición de una arcilla villar:

C. Química	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P.P.C.
% en peso	57,5	21,9	7,66	0,62	1,44	0,44	3,55	1,09	6,3

Tabla 3: Composición química arcilla villar

C. Mineralógica	Caolinita	Illita	Cuarzo	Carbonatos	Feldespatos	Compuesto de Fe y Ti	Clorita	Otros
% en peso	19	22	39	3	8	7	-	2

Tabla 4: Composición mineralógica arcilla villar

Este tipo de arcilla se caracteriza por tener un contenido elevado en hierro que le confiere un color rojizo.

El líquido utilizado como aglutinante en los ensayos de granulación es agua destilada. La característica más destacable del agua como aglutinante para la granulación es su baja viscosidad.

En la siguiente tabla podemos ver sus propiedades más relevantes:

	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Tensión superficial (mN/m)	Viscosidad (mPa s)	Ángulo de contacto (°)
Agua destilada	1000	72,2	1,0	69,0

Tabla 5: Propiedades físico-químicas del aglutinante

### 4.3. Variables analizadas

Cómo ya se ha comentado anteriormente en este trabajo, la granulación es un proceso difícil de controlar y en el que hay presentes muchas variables que pueden afectar a los resultados obtenidos.

En este trabajo se han estudiado las variables del equipo de granulación y la variable humedad. Todas estas variables pueden ser controladas con exactitud de forma que a partir de la realización de un diseño de experimentos y el correspondiente análisis de resultados, se puede determinar cómo influyen en el proceso cada una de las variables.

Además de estas variables, también se ha tenido en cuenta el método de vertido. Los efectos del método de vertido se han analizado únicamente en las pruebas iniciales anteriores al diseño de experimentos, para comprobar con cuál de los dos métodos empleados (vertido directo o pulverización) se obtenían mejores resultados.

Las variables estudiadas son:

- Humedad
- Tiempo de granulación
- Velocidad de granulación

#### Humedad

La humedad es la variable más importante en el proceso de granulación y no depende del equipo, sino del material. Los valores de humedad estudiados se sitúan alrededor del 13%, aplicándose variaciones de un punto porcentual para comprobar los cambios que se experimentan en el material granulado. Se utiliza esta humedad porque se ha visto en estudios previos que es la que necesita la arcilla para granularse.

La humedad se controla con la relación líquido-sólido de la mezcla. De este modo, en un primer momento se pesa la arcilla que se va a granular, normalmente 1500 gramos, y posteriormente se añade la cantidad de agua necesaria para obtener la humedad deseada teniendo en cuenta que el material ya tiene un 2% de humedad.

#### Tiempo de granulación

Esta variable está relacionada con el tiempo que pasa la mezcla de material y aglutinante dentro de la granuladora en funcionamiento. A pesar de que la

granuladora tiene un sistema para medir el tiempo de granulación, se ha calculado utilizando un cronómetro manual.

En los ensayos en los que el aglutinante se ha añadido por pulverización, el tiempo de granulación se contabiliza desde el momento en que se empieza a añadir el agua.

### **Velocidad de granulación**

La velocidad de granulación es la velocidad de rotación de las cuchillas de la granuladora. La granuladora de alta cizalla Lödige M5R tiene una velocidad de rotación máxima de 350 rpm.

Para regular la velocidad de granulación, el quipo dispone de un sistema consistente en una rueda numerada que, en función de la posición en la que se encuentre, fija la velocidad.

Las posiciones utilizadas en el sistema de regulación de velocidad son la 10, 1 y 3,5 para las pruebas iniciales, siendo la posición 10 la velocidad baja y la 3,5 la alta. Posteriormente, para el diseño de experimentos se utiliza la posición 1 como velocidad baja, la 3,5 como alta y la posición 2 como media.

En la siguiente tabla se muestra la velocidad aproximada en revoluciones por minuto para cada una de estas posiciones:

Posición	Velocidad (rpm)
10	90
1	230
2	280
3,5	350

*Tabla 6: Velocidad de granulación*

## **4.4. Método de ensayo**

### **4.4.1. Ensayo de granulación. Metodología**

Todos los ensayos de granulación realizados se llevaron a cabo siguiendo la misma metodología.

1. En primer lugar se pesa el material utilizando una báscula electrónica. La arcilla se coloca dentro de una bolsa de plástico previamente tarada y se añade progresivamente hasta alcanzar una masa de 1500 gramos. Una vez ya se tiene la cantidad de material correcta, éste se vierte en la cubeta de granulación.
2. A continuación se coge la cantidad de agua destilada necesaria en función de la humedad con la que se desea realizar el ensayo, teniendo en cuenta el 2% de humedad que ya tiene el material. Por ejemplo, para realizar un ensayo con

una humedad del 14% sería necesario añadir un 12% de agua a la arcilla. Teniendo en cuenta que la cantidad de material es de 1500 gramos, la cantidad de agua sería de 180 mililitros.

3. Si el ensayo se realiza por vertido directo del aglutinante, el agua se añade al recipiente con la arcilla y se cierra la cubeta de granulación. En el caso de que el ensayo se realice por pulverización, se realiza el montaje de la boquilla sobre un soporte de laboratorio.
4. Se pone en funcionamiento la granuladora y se regula la velocidad hasta la posición deseada. El cronómetro se pone en marcha y en caso de que el vertido se realice por pulverización se empieza a añadir el líquido a la boquilla con las jeringuillas y a una velocidad constante.
5. Cuando se ha completado el tiempo de granulación del ensayo, se detiene la granuladora y se extrae una muestra de material. Como para unas mismas condiciones de humedad y velocidad de granulación hay varios tiempos de granulación, una vez se saca una muestra, se continúa con la granulación hasta que se alcanza el siguiente tiempo de granulación y se saca una nueva muestra.
6. Una vez extraído todo el material en las correspondientes muestras, se limpia el equipo para que esté listo para utilizarse en los próximos ensayos.
7. Por último se mide la humedad de cada una de las muestras utilizando una balanza de infrarrojos y se ponen a secar en una estufa para reducir la humedad y poder realizar la distribución granulométrica y el resto de ensayos de caracterización de las muestras.

#### **4.4.2. Ensayos de caracterización**

Además de obtener la distribución granulométrica de cada una de las muestras, también se realizan otros ensayos de caracterización que nos permiten estudiar otras propiedades del material granulado como la dureza, la forma o la fluidez.

Estos ensayos no se realizan con todas las muestras, sino únicamente con aquellas que se consideran más significativas para poder ver cómo afectan las variables del proceso en las propiedades estudiadas. Así, se compararán muestras de alta y baja humedad, y muestras de alta y baja velocidad de granulación.

Con estos ensayos podemos comparar las características de los gránulos obtenidos mediante el proceso de granulación con los obtenidos por el método de secado por atomización. De este modo, se analizará si con las propiedades obtenidas resulta factible el proceso de granulación como alternativa a la atomización.

#### **Distribución granulométrica**

Para todos los ensayos se va a medir la humedad y se realizará la distribución de tamaños de gránulo.

Para poder tamizar el material correctamente y obtener la distribución, éste tiene que tener una humedad inferior al 0,5%. Por lo tanto, es necesario secar el material en una estufa ya que la humedad que se obtiene en el proceso de granulación suele estar entre el 12% y el 14%.

Para obtener la distribución granulométrica se utiliza un vibrotamiz sobre el que se monta una torre con los distintos tamices que se desean utilizar. En los ensayos realizados se han utilizado tamices de 125, 200, 300, 500, 710 y 2000 micras.

El montaje que hay que realizar consiste en hacer una torre colocando el tamiz más pequeño en la parte de abajo e ir colocando encima los tamices en orden creciente de tamaños hasta colocar el más grande en la parte superior. Debajo del tamiz más pequeño se coloca un recipiente donde caerá el material más fino.



*Figura 15: Montaje del vibrotamiz*

Antes de realizar este montaje hay que pesar cada uno de los tamices para luego poder saber la cantidad de material que contiene cada uno de ellos.

La torre con los tamices se coloca encima del vibrotamiz y se aprieta con un dispositivo para asegurar que la torre no se mueva durante el proceso.

Una vez el montaje ya está realizado, se pone a funcionar el vibrotamiz a una potencia de vibración media y durante siete minutos.

Cuando han pasado los siete minutos, se desmonta la torre y se pesa cada uno de los tamices. La cantidad de material que hay en cada tamiz será la diferencia entre el peso medido y el peso del tamiz.

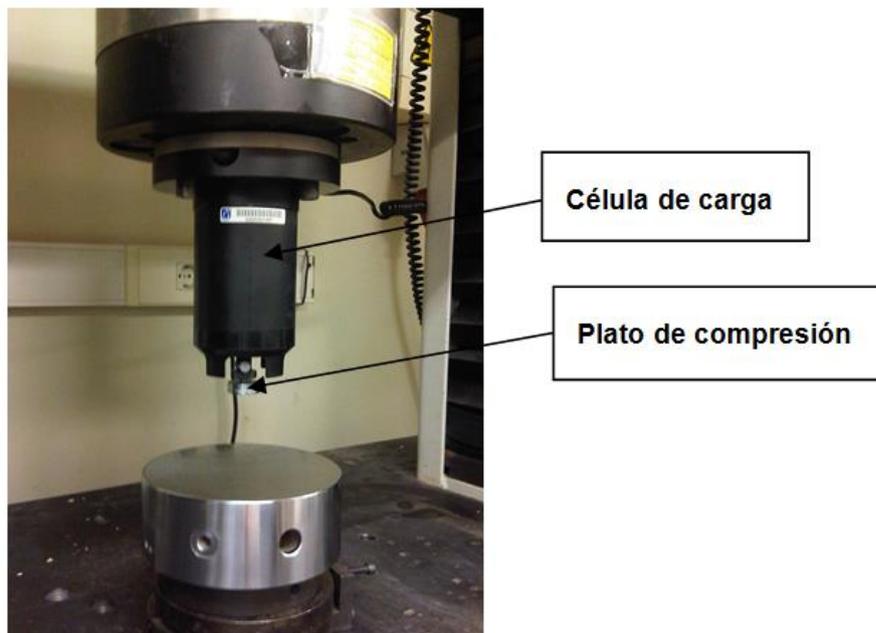
Posteriormente los datos se colocan en una plantilla de Excel para obtener el porcentaje de masa de cada tamaño y el gráfico de la distribución.

### **Dureza de gránulo**

La dureza de gránulo se mide utilizando una máquina de ensayos universal Instron. De los distintos ensayos que permite realizar esta máquina, en este caso se ensaya la resistencia a la compresión de los gránulos.

Para realizar el ensayo de dureza de gránulo, el primer paso es seleccionar un conjunto de gránulos previamente tamizados para que sean del mismo tamaño. Se tamiza entre dos tamices (400-500 micras) y tras observar con una lupa su esfericidad, se seleccionan los más redondos. El ensayo se realiza al menos con diez gránulos distintos para que el error sea lo menor posible.

Para medir la dureza de los gránulos se monta en la máquina la célula de carga de menor capacidad, correspondiente a 10 Newton y se utiliza un plato de compresión específico, con el que se rompe un único gránulo en cada ensayo.



*Figura 16: Máquina de ensayos universal Instron*

Se coloca un gránulo entre el plato que hace de base y el plato de compresión, y se aproxima manualmente el plato de compresión y la célula de carga hasta que están prácticamente en contacto con el gránulo.

En esta posición, desde el programa de ordenador que controla la máquina, se ordena iniciar el ensayo. La máquina avanza lentamente y por pantalla se muestra la fuerza desarrollada.

Cuando el dispositivo de medida entra en contacto con el gránulo, la fuerza experimenta un crecimiento igual a la resistencia de compresión del gránulo. Una vez alcanzado el pico de fuerza, cuando el gránulo rompe debido a la carga, la fuerza desciende. Hay que detener el ensayo antes de que el plato de compresión entre en contacto con la base.

Se guardan los resultados en el ordenador y se limpia la base para colocar un nuevo gránulo y repetir el ensayo.

### **Ensayo de fluidez**

Anteriormente se ha explicado la importancia que tiene la fluidez del material granulado en el llenado del molde para el prensado de las baldosas cerámicas.

Se realiza un ensayo para analizar la fluidez de distintas muestras de material granulado.

La realización de este ensayo consiste en colocar el material dentro de un embudo con un orificio calibrado cuya apertura se controla con una válvula.

Se pesa el material antes de colocarlo en el embudo.

Una vez se ha colocado el material, con un botón se abre la válvula y el material empieza a caer. Mientras se mantenga el botón pulsado, un cronómetro mide el tiempo que pasa. Justo en el momento en que acaba de caer el material, hay que dejar de pulsar el botón y el cronómetro se detiene.

Con el tiempo que marca el cronómetro y la cantidad de material que se ha utilizado, se puede obtener la velocidad de flujo como cantidad de material por unidad de tiempo. Una mayor velocidad de flujo indicará una mayor fluidez del material.

Hay que tener en cuenta que el resultado de este ensayo depende del tamaño del orificio del embudo y por lo tanto los resultados solo son interpretables en términos comparativos con otras muestras ensayadas de la misma forma.



*Figura 17: Ensayo de fluidez*

### **Ensayo de compactación de lecho. Índice de Hausner**

El ensayo de compactación de lecho se utiliza para observar hasta qué punto se compacta un material pulverulento al ser agitado. Los resultados de este ensayo están relacionados, al igual que en el ensayo anterior, con la fluidez del material.

Mediante este ensayo se determina el índice de Hausner, que es un indicador de la fluidez de un material granulado o de un polvo.

El ensayo consiste en verter en una probeta cilíndrica el material granulado hasta que la probeta esté completamente llena. Entonces se enrasa y se pesa para conocer la masa del material. Anteriormente la báscula tiene que haberse tarado con el peso de la probeta. La probeta que se utiliza en este ensayo es de 100 cm<sup>3</sup>.

A continuación se coloca la probeta sobre la superficie de un vibrotamiz y se pone en funcionamiento el equipo a una potencia que no provoque que se levante polvo de la probeta. Se mantiene con la mano la probeta sobre la superficie durante unos 5 minutos y se realizan movimientos para asegurarse de que el material se compacta lo máximo posible. Cuando el material ya no se compacta más se observa hasta que nivel ha descendido el material en la probeta.



*Figura 18: Ensayo de compactación de lecho*

A partir de la masa de material, el volumen inicial del material y el volumen final se obtienen la densidad aparente (densidad inicial) y la densidad vibrada (densidad cuando el material ya está compactado).

El índice de Hausner se calcula como la relación entre la densidad vibrada y la densidad aparente.

La siguiente tabla muestra una interpretación del índice de Hausner.

Índice de Hausner	Fluidez
>1,25	Pobre
1,25	Regular
1,18-1,19	Buena
1,14	Muy buena
1,1 – 1,09	Excelente

*Tabla 7: Interpretación del índice de Hausner*

### **Forma y esfericidad de gránulo**

Utilizando un microscopio se analiza la esfericidad de los gránulos obtenidos en el proceso de granulación.

El principal interés de este ensayo reside en comparar la forma del material granulado con el que se obtiene con el proceso de secado por atomización.

Se coloca en el portamuestras una pequeña cantidad de material granulado del mismo tamaño. Girando los tornillos macrométrico y micrométrico se regula el enfoque para ver la muestra con claridad y con el tamaño deseado.

Con la cámara que hay incorporada en el microscopio y un programa de ordenador, se puede ver por el monitor la imagen. Cuando se tiene el enfoque deseado, con el programa se captura la imagen y se coloca la escala.

#### 4.5. Ensayos iniciales

Antes de realizar el diseño de experimentos resulta conveniente realizar una serie de ensayos iniciales para ver qué valores tienen que tomar cada una de las variables analizadas para obtener unos resultados satisfactorios.

De este modo, a partir de los ensayos iniciales nos podemos hacer una idea de los niveles máximo y mínimo que deben de tomar en el diseño de experimentos cada una de las tres variables analizadas.

Utilizar unos valores adecuados de cada variable en el diseño de experimentos nos permite obtener unos resultados coherentes para su posterior análisis y podremos optimizar el proceso de granulación de forma más satisfactoria.

En la tabla del diseño de experimentos del siguiente apartado 4.6. *Diseño de experimentos*, se puede ver más claramente cuáles han sido los distintos niveles que se le han asignado a cada variable para estudiar su influencia en el proceso de granulación.

Como se ha visto anteriormente, incrementar las fracciones de 300 y 500 micras mejora las propiedades del material granulado para realizar la etapa de prensado. Por lo tanto, ese es el objetivo que se persigue con el estudio de los resultados del diseño de experimentos y con el apartado posterior 5.1.2. *Optimización del proceso*.

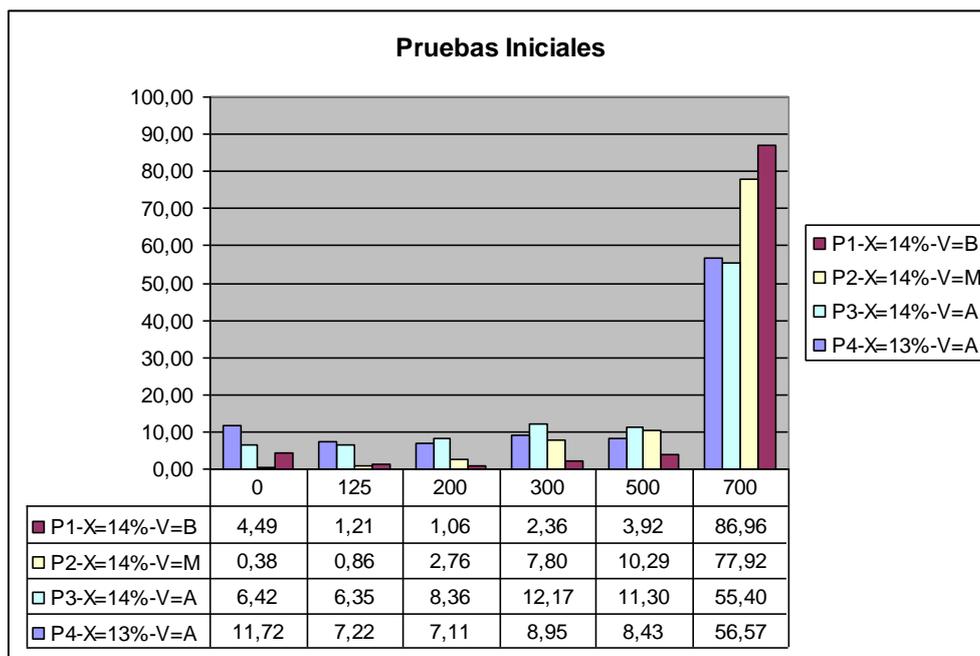


Figura 19: Pruebas iniciales para definir los niveles de las variables

### **Rango de velocidades**

A partir de los resultados obtenidos en estas pruebas iniciales (Figura 19), se observa que para la velocidad baja (posición 10 del regulador de velocidad), prácticamente todos los gránulos son gruesos, por lo que en el diseño de experimentos la velocidad se ha acotado a valores más elevados. De este modo, se ha fijado que la velocidad baja en el diseño de experimentos sea la velocidad media de estos ensayos iniciales (posición 1), siendo la velocidad alta la máxima que admite la máquina (posición 3,5).

### **Rango de cantidad de ligante**

En el caso de la humedad, se ha decidido que el 14% sea el valor alto ya que se observa que con esta humedad se granula mucho y queda muy poco material fino (<125 micras). Como valor bajo se ha decidido tomar el 12% y como medio el 13%.

Hay que tener en cuenta que en estos ensayos iniciales el tamiz de mayor tamaño que se ha utilizado es el de 700 micras. Este tamiz es un poco pequeño para ser el más grande y sería más conveniente utilizar otro tamiz por encima del de 700 micras. Esto ha provocado que el gráfico quede muy desplazado a la derecha. En las distribuciones granulométricas del diseño de experimentos ya se utiliza un tamiz de 2000 micras para obtener una distribución más precisa y más fácil de analizar.

### **Influencia del método de adición del ligante**

Otro factor que se ha tenido en cuenta inicialmente ha sido el tipo de vertido. De este modo, antes de realizar el diseño de experimentos, se han realizado una serie de ensayos mediante vertido directo y mediante pulverización, para determinar cuál de estos dos métodos de vertido permite obtener unos mejores resultados.

Las distribuciones granulométricas obtenidas en los ensayos para determinar el método de vertido más adecuado son las siguientes:

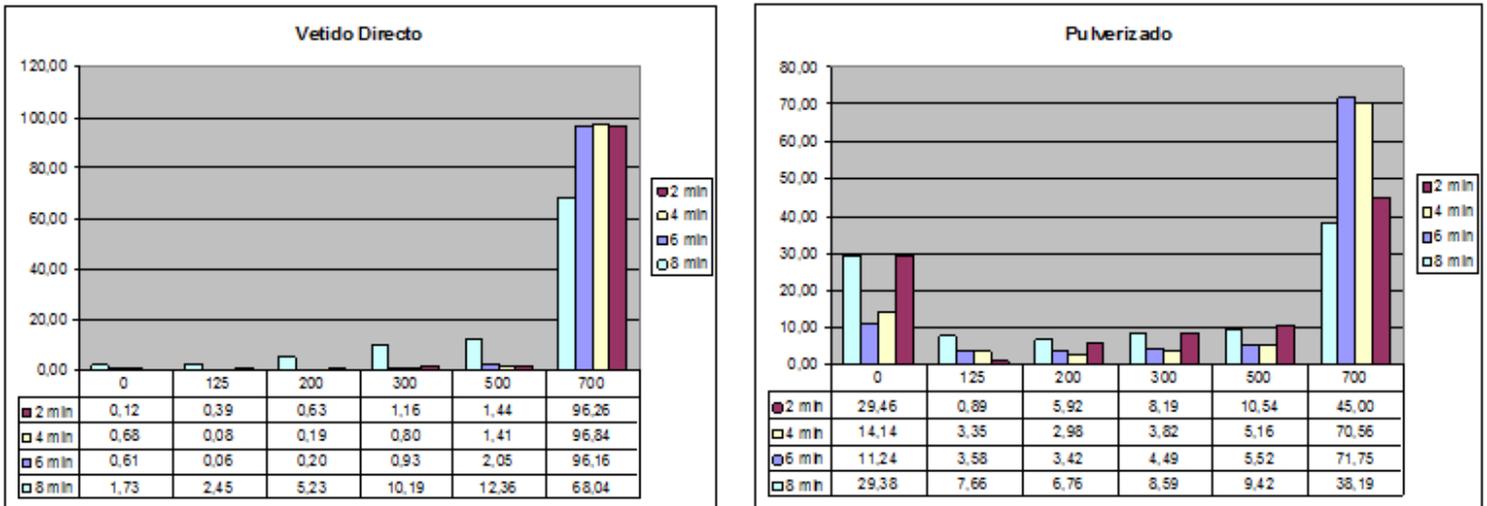


Figura 20: Comparación vertido directo y pulverizado

Los ensayos se han realizado con las mismas condiciones de humedad y velocidad. A partir de los 6 minutos de tiempo de granulación, se coloca la cuchilla para romper los gránulos de mayor tamaño.

Cómo se observa en los gráficos (Figura 20), los resultados con pulverizado son visiblemente mejores que realizando el vertido de forma directa. Con el vertido directo, prácticamente la totalidad de los gránulos que se forman son muy gruesos y no es hasta la colocación de la cuchilla cuando empieza a aparecer un cantidad considerable de gránulos del tamaño deseado (fracciones de 300 y 500 micras). Como ya se ha explicado anteriormente, este tamaño de gránulo es el óptimo para realizar la etapa de prensado.

En el vertido por pulverizado se observa que a partir de los dos minutos se produce un crecimiento importante de la cantidad de gránulos de más de 700 micras en detrimento del resto de tamaños de gránulo. Finalmente, cuando se coloca la cuchilla, la distribución que se consigue es similar a la de los dos minutos de tiempo de granulación.

A partir de estos resultados, se decide que el diseño de experimentos se realice utilizando vertido por pulverización y que el tiempo de granulación sea de 2 y 3 minutos. A partir de los dos minutos se colocará la cuchilla para evitar que se produzca más crecimiento de gránulos grandes.

#### 4.6. Diseño de experimentos

Un diseño de experimentos es una técnica de análisis estadístico utilizada para determinar y cuantificar el efecto que provocan en un estudio experimental unas determinadas variables.

En este caso el estudio experimental es el proceso de granulación y los factores del experimento son la humedad, la velocidad de granulación y el tiempo de granulación.

Se realiza un diseño factorial que nos permite estudiar cuál es el efecto que produce en la variable de salida, en este caso la distribución granulométrica, cada uno de los factores por separado y la interacción entre estos factores.

De las tres variables de entrada analizadas, la humedad y la velocidad toman tres niveles distintos, mientras que el tiempo de granulación únicamente toma dos niveles.

A continuación se muestran los niveles que toma cada una de las variables de entrada:

<b>Variable de entrada</b>	<b>Niveles</b>
Humedad (%)	12 - 13 - 14
Velocidad de granulación (posición del regulador)	1 - 2 - 3,5
Tiempo de granulación (min)	2 – 3

*Tabla 8: Niveles de las variables de entrada*

Como en un diseño factorial se realizan todas las posibles combinaciones de los distintos niveles de cada factor, en este caso, en el que dos factores tienen tres niveles y otro tiene dos, se necesitarían 18 ensayos.

Cada posible combinación representa un cambio en alguna de las variables de entrada. Así, a partir de los cambios en los resultados obtenidos en cada ensayo se puede analizar matemáticamente cual es el efecto que produce cada una de las variables.

En la siguiente tabla se muestra la matriz del diseño de experimentos, con sus 18 ensayos y los niveles que toma cada factor en cada uno de los ensayos.

Experimento	Humedad (%)	Velocidad (regulador)	Tiempo (min)
1	13	1	2
2	13	2	2
3	13	3,5	2
4	12	1	2
5	12	2	2
6	12	3,5	2
7	14	1	2
8	14	2	2
9	14	3,5	2
10	13	1	3
11	13	2	3
12	13	3,5	3
13	12	1	3
14	12	2	3
15	12	3,5	3
16	14	1	3
17	14	2	3
18	14	3,5	3

*Tabla 9: Matriz del diseño de experimentos*

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Distribución granulométrica

#### 5.1.1. Análisis de la influencia de las variables

Mediante el diseño de experimentos definido en el apartado anterior, se realizan los 18 ensayos correspondientes y posteriormente se obtiene la distribución granulométrica de cada uno de ellos.

La distribución granulométrica es la variable de salida del diseño de experimentos. Para poder realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos, se han agrupado los distintos tamaños de gránulo en tres grupos:

- Gránulos finos: todos aquellos que tienen un tamaño menor a 125 micras. Este grupo está formado principalmente por el material que no se ha granulado y que está en forma de polvo.
- Gránulos medios: aquellos cuyo tamaño está comprendido entre las 200 y las 710 micras. Hay que maximizar la cantidad de estos gránulos.
- Gránulos gruesos: todos aquellos con un tamaño mayor a 710. Dentro de este grupo, los gránulos de más de 2 milímetros de diámetro son excesivamente grandes y hay que intentar que se formen los mínimos posibles.

Una vez obtenida la distribución granulométrica de cada uno de los ensayos, estos son los resultados del diseño experimental:

Experimento	D<125μm (%)	200μm<D<710μm (%)	D>710μm (%)
1	33,04	24,35	36,11
2	23,2	22,52	49,14
3	26,66	27,59	39,34
4	41,41	25,37	26,1
5	38,76	24,11	31,22
6	26,79	24,69	42,92
7	11,57	21,39	63,61
8	11,81	27,41	56,36
9	4,01	28,76	64,02
10	18,25	23,92	52,74
11	14,82	25,29	54,8
12	12,66	27,74	53,53
13	29,72	24,99	39,31
14	25,72	23,87	44,79
15	19,36	25,48	49,27
16	12,45	25,48	56,63
17	7,54	28,86	57,79
18	0,66	22,69	73,95

Tabla 10: Resultados experimentales

Los resultados completos de los ensayos de granulación de cada uno de los experimentos se encuentran en la sección de ANEXOS de este trabajo.

Para analizar los resultados y poder determinar cuál es la influencia de cada una de las variables de entrada analizadas, se utiliza el método de análisis de la varianza ANOVA.

Con este análisis estadístico se determinan los efectos principales de cada una de las variables de entrada y los efectos de las interacciones de segundo orden.

El método ANOVA se lleva a cabo con el programa de análisis estadístico R-Studio. Este programa tiene la ventaja de que dispone de un complemento específico para analizar los resultados de un diseño experimental como el que se ha utilizado en este trabajo.

Para determinar si la influencia de una determinada variable es significativa, se utilizará un nivel de confianza del 95%. Para interpretar este nivel de confianza, el efecto de una variable o de una interacción será significativo cuando en los resultados del análisis de la varianza, la significancia sea menor que 0,05. La significancia se muestra como  $Pr(>F)$ .

### Gránulos gruesos ( $D > 710\mu\text{m}$ )

El análisis de los gránulos grandes nos permite identificar cuáles son las variables que más influyen en la formación de gránulos con un diámetro mayor de 710 micras.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis de la varianza, en la que encontramos la suma de cuadrados (Sum Sq) de los efectos principales y sus respectivas interacciones de segundo grado, los grados de libertad (Df), el estadístico F (F value) y el nivel de significación ( $Pr > F$ ).

Los indicadores que hay que tener en cuenta son, por una parte el nivel de significación, de modo que si este es menor que 0,05 podemos considerar que la variable es significativa, y por otra parte la suma de cuadrado, ya que nos indica la mayor o menor influencia que tiene un determinado efecto.

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
Humedad	1637,65	2	29,1438	0,004124
Velocidad	198,68	2	3,5358	0,130528
Tiempo	304,14	1	10,8250	0,030211
Humedad:Velocidad	197,41	4	1,7566	0,299318
Humedad:Tiempo	103,79	2	1,8470	0,270276
Velocidad:Tiempo	8,83	2	0,1572	0,859576
Residuals	112,38	4		

Tabla 11: ANOVA gránulos grandes

A partir de la tabla anterior se observa que únicamente las variables humedad y tiempo son significativas con un nivel de confianza del 95%. La velocidad de granulación y las interacciones de segundo orden no son significativas.

En relación al efecto de las variables significativas, en las siguientes gráficas se puede ver el efecto que tiene la humedad y el tiempo en la cantidad de gránulos de tamaño grande que se forman:

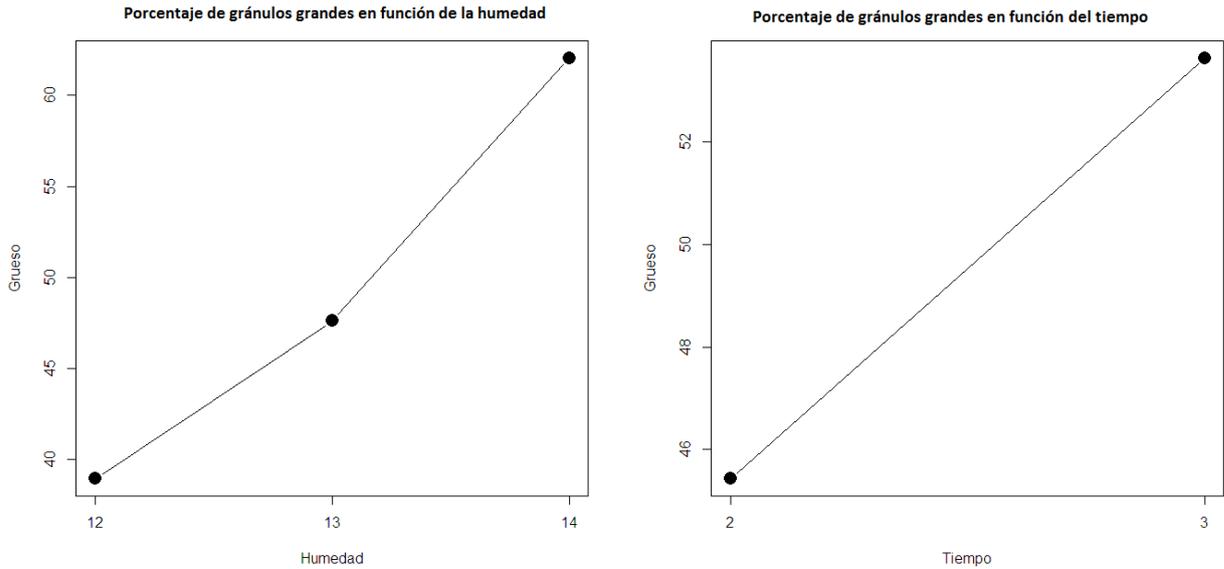


Figura 21: Variación de la cantidad de gránulos grandes en función de las variables de entrada

Se observa que la humedad es el efecto que más influye en la formación de gránulos gruesos, de forma que cuanto mayor es la humedad mayor es el porcentaje de gránulos grandes que se forman durante el proceso de granulación.

El efecto del tiempo también es positivo, es decir, a mayor tiempo de granulación mayor es la cantidad de gránulos grandes que se forman.

Se puede ver que el efecto de la humedad es ligeramente mayor cuando ésta pasa del 13% al 14% que cuando lo hace del 12% al 13%.

### Gránulos medios ( $200\mu\text{m} < D < 710\mu\text{m}$ )

Con el análisis de los gránulos medios podemos identificar cuáles son las variables de entrada más significativas en la formación de gránulos cuyo tamaño está comprendido entre 200 micras y 710 micras.

De la misma forma que se ha hecho con los gránulos gruesos, a partir de aplicar el método ANOVA se identifican las variables más significativas y los efectos que tienen sobre el proceso estas variables.

En la tabla siguiente se muestran los resultados del análisis de la varianza de los gránulos medios:

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
Humedad	30,8270	2	0,2735	0,7738
Velocidad	110,027	2	0,9763	0,4515
Tiempo	0,2521	1	0,0447	0,8428
Humedad:Velocidad	306,092	4	1,3581	0,3870
Humedad:Tiempo	0,8329	2	0,0739	0,9300
Velocidad:Tiempo	85,6720	2	0,7602	0,5250
Residuals	225,387	4		

Tabla 12: ANOVA gránulos medios

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de la varianza, se observa que ninguno de los efectos de las variables de entrada es significativo para un nivel de confianza del 95%.

Este resultado tiene su lógica ya que si se observan los resultados del diseño de experimentos se puede ver que la cantidad de gránulos de tamaño medio está comprendido entre un 21% y 29% en todos los experimentos. Por lo tanto, era previsible que ninguna de las variables de entrada tuviera una influencia suficiente para que su efecto fuera significativo.

En cambio, con la cantidad de gránulos grandes y pequeños sí que se observan cambios muy importantes en función de cuales sean los valores de las variables de entrada.

### Gránulos finos ( $D < 125\mu\text{m}$ )

Se han considerado como gránulos finos todos aquellos cuyo tamaño es menor a 125 micras. Esto incluye los gránulos más pequeños que apenas han experimentado crecimiento y el polvo.

Del mismo modo que con los gránulos gruesos y medios, a través del análisis de la varianza se determina cuáles son las variables de entrada significativas con un nivel de confianza del 95% y cuál es el efecto que producen estas variables en el proceso de granulación.

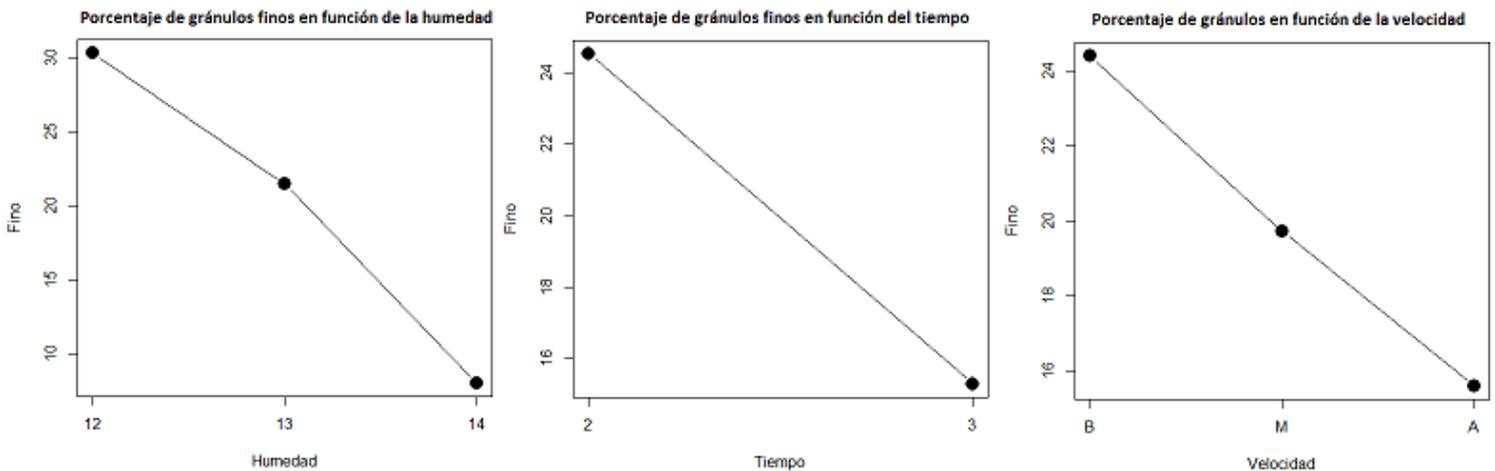
En la siguiente tabla se muestra el resultado del análisis de la varianza:

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
Humedad	1511,03	2	71,3725	0,000743
Velocidad	232,39	2	10,9768	0,023753
Tiempo	383,92	1	36,2685	0,00383
Humedad:Velocidad	51,08	4	1,2065	0,430022
Humedad:Tiempo	50,46	2	2,3836	0,208159
Velocidad:Tiempo	1,18	2	0,0558	0,946421
Residuals	42,34	4		

Tabla 13: ANOVA gránulos finos

A partir de los resultados del ANOVA, tenemos que todos los efectos principales son significativos para un nivel de confianza del 95%, mientras que todas las interacciones de segundo grado no son significativas.

En las siguientes gráficas se muestra el efecto que tiene sobre el proceso de granulación cada una de las variables significativas, en este caso la humedad, el tiempo y la velocidad de granulación.



*Figura 22: Variación de la cantidad de gránulos finos en función de las variables de entrada*

A partir de las gráficas se observa que el efecto que más influye en la formación de gránulos finos es la humedad, mientras que el tiempo y la velocidad de granulación tienen efectos similares.

La humedad tiene un efecto negativo, de forma que a medida que aumenta la humedad disminuye la cantidad de gránulos finos resultantes en el proceso de granulación. Este efecto se hace ligeramente más apreciable cuando la humedad pasa del 13% al 14%.

El efecto del tiempo también es negativo, reduciéndose el porcentaje de gránulos finos a medida que aumenta el tiempo de granulación.

El efecto de la humedad y el tiempo en la formación de gránulos finos es muy similar al que tienen en la formación de gránulos grandes, pero en un caso el efecto es positivo y en el otro negativo. Este resultado es lógico porque como se ha visto en el análisis de los gránulos de tamaño medio, no existen grandes diferencias en su cantidad entre los distintos experimentos.

Por lo tanto, un incremento en la cantidad de gránulos grandes provocará una disminución en la cantidad de finos.

Refiriéndonos al efecto de la velocidad de granulación, se observa que su efecto es también negativo, por lo que un aumento de la velocidad provoca una disminución de gránulos finos. El efecto de la velocidad es prácticamente lineal.

### 5.1.2. Optimización del proceso

El objeto de este trabajo es estudiar el proceso de granulación y optimizarlo para ser capaces de replicar los resultados que se consiguen con el secado por atomización, proceso utilizado en la industria de las baldosas cerámicas en la actualidad.

A pesar de que el secado por atomización es un proceso muy intensivo en lo que se refiere al consumo de energía, las características del material granulado que se obtiene son muy favorables para la posterior etapa de prensado de las baldosas cerámicas.

Con la optimización del proceso de granulación se intenta igualar las características del atomizado, y aparte, aprovechar el ahorro energético que supone esta tecnología.

En la siguiente figura se muestra la distribución granulométrica de un gres obtenido por atomización:

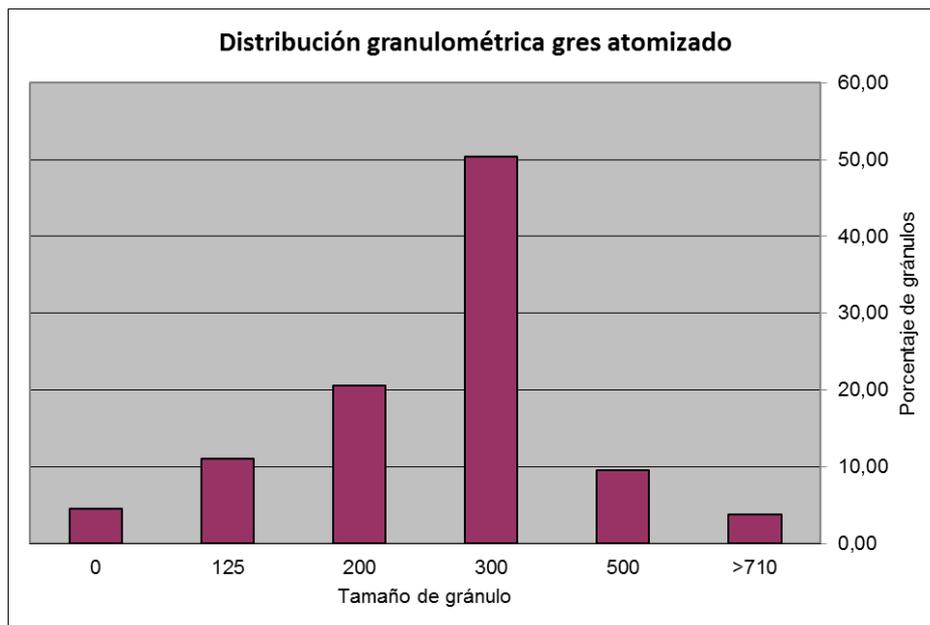


Figura 23: Distribución granulométrica de un gres atomizado

Como se ha explicado anteriormente en este trabajo en la sección 3.7. *Características del material granulado para el prensado*, el material granulado obtenido con el proceso de secado por atomización tiene unas propiedades óptimas para el prensado cuando el tamaño de gránulo está entre 150 micras y 400 micras. Como se puede ver en la figura 23, la distribución granulométrica que se consigue con esta técnica es ideal ya que se consigue que la distribución esté centrada en estos tamaños.

En el caso del material molturado en seco y posteriormente granulado, se consigue una fluidez más elevada y una densidad aparente adecuada para realizar la etapa de prensado cuando el tamaño de gránulo está entre 200 y 500 micras.

Por lo tanto, las medidas adoptadas para optimizar el proceso tienen que ir encaminadas a maximizar la cantidad de gránulos medios (200 – 710 micras) y minimizar tanto los finos como los gruesos.

El análisis estadístico de los resultados del diseño experimental nos ha permitido conocer cómo influyen las variables de entrada del proceso en la formación de los distintos tamaños de gránulo.

Cuando la humedad es baja se forman gran cantidad de gránulos finos y polvo, lo que no favorece el proceso de prensado de las baldosas. Lo mismo sucede cuando la velocidad de granulación es baja.

Como se ha visto en el análisis de los resultados, para los tiempos de granulación y las humedades estudiadas, a mayor velocidad de granulación mayor es la cantidad de gránulos grandes que se forman.

De este modo, si se comparan los resultados obtenidos a velocidades medias y altas se observa que a velocidad alta se forman entre un 5% y 10% más de gránulos gruesos. Este incremento de la cantidad de gránulos gruesos se traduce en una reducción porcentual similar en la cantidad de gránulos finos.

Sin embargo, a pesar de que a alta velocidad la cantidad de gránulos gruesos es mayor, se puede ver que la cantidad de los gránulos más grandes (mayores de 2000 micras) es similar a la que se forma a velocidad media e incluso menor en algunos casos.

Teniendo en cuenta que tamaños de gránulo tan grandes no son deseables, y que con velocidades elevadas se produce una disminución de la cantidad de finos, se ha considerado que la velocidad de granulación alta es la más conveniente para conseguir los resultados más optimizados posibles.

En referencia a la humedad se tendrá en cuenta tanto la media como la elevada.

Para un tiempo de granulación de dos minutos y las condiciones humedad y velocidad citadas anteriormente, se tienen los resultados de los experimentos 3 y 9. Cuando el tiempo de granulación llega a los tres minutos con las condiciones de esos dos experimentos (experimentos 12 y 18), se observa una disminución en la cantidad de finos y un incremento en la cantidad de gruesos.

En el caso del experimento 9, al pasar de dos a tres minutos se observa también una disminución de la cantidad de medios.

En la siguiente figura se muestra una comparación de la distribución granulométrica de los experimentos realizados a velocidad alta y humedad media y alta. Se realiza la comparación a los dos minutos (experimentos 3 y 9) y a los 3 minutos (experimentos 12 y 18).

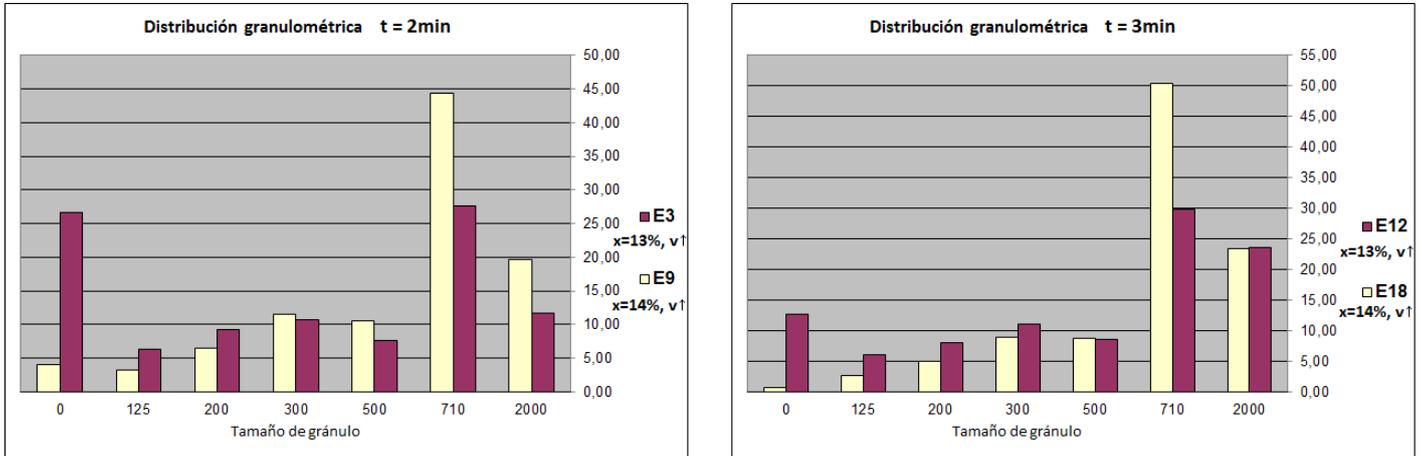


Figura 24: Comparación distribución granulométrica

A partir de estas distribuciones granulométricas se puede observar claramente cómo se reduce la cantidad de finos pero no se produce ningún incremento en la cantidad de medios.

Por lo tanto, una alternativa lógica para optimizar el proceso, incrementando la cantidad de medios, consistiría en ser capaces de romper los gránulos gruesos para formar gránulos más pequeños, ya que modificando los valores de las variables de entrada no se consigue.

En este sentido, la granuladora Lödige M5R dispone de un sistema tipo cuchilla para romper los gránulos. Este sistema consiste en un accesorio que se acopla en la parte superior del recipiente de granulación y que contiene dos placas metálicas con agujeros que entran dentro la cubeta de granulación.

Cuando la granuladora está en funcionamiento, la cuchilla agita el material provocando que éste choque contra las placas y se rompa.

El procedimiento que se sigue para optimizar el proceso consiste en una primera etapa en la que se replican los experimentos 3 y 9. A partir de ahí se coloca el dispositivo de cuchilla y se continua con la granulación durante tres minutos, extrayéndose una muestra cada minuto que pasa con la cuchilla colocada.

A continuación se muestra la evolución de la cantidad de gránulos medios que se ha conseguido siguiendo el procedimiento anterior tanto para las condiciones del experimento 3 como del 9:

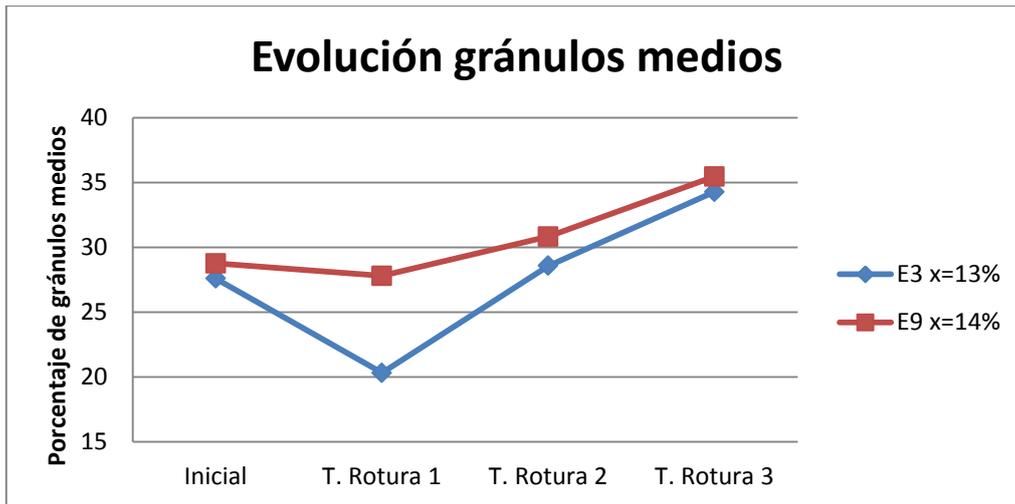


Figura 25: Evolución de la cantidad de gránulos medios

Se observa que durante el primer minuto que está colocada la cuchilla se produce una disminución en la cantidad de gránulos medios, más acusada con las condiciones del experimento 3, y que posteriormente se produce un incremento importante hasta alcanzar una cantidad de medios alrededor del 35% en ambos casos.

En el siguiente gráfico se observa la comparación de las distribuciones granulométricas cuando el tiempo de rotura utilizando la cuchilla es de tres minutos:

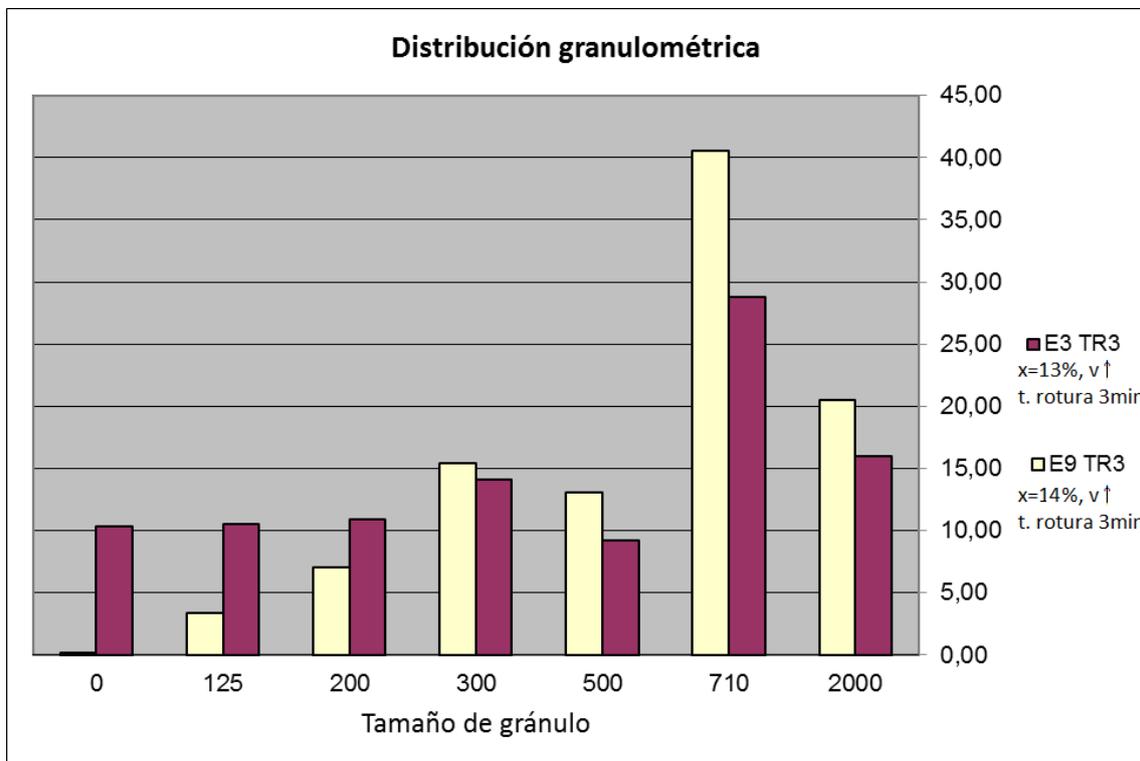


Figura 26: Comparación distribución granulométrica con un tiempo de rotura de 3 minutos

En la gráfica se observa que la cantidad de gránulos medios es similar. La cantidad de finos es considerablemente mayor con las condiciones del experimento 3, lo cual era predecible ya que la humedad es menor.

Esa mayor cantidad de gránulos finos se compensa con una menor cantidad de gránulos grandes, principalmente en aquellos cuyo tamaño está entre 710 y 2000 micras.

Las distribuciones granulométricas obtenidas son mejores que cualquiera de las del diseño de experimentos, ya que la cantidad de gránulos medios es considerablemente superior. Se ha pasado de un 28% de gránulos medios a un 35%.

Sin embargo, ninguna de estas distribuciones llega a ser la óptima ya que para ello la distribución debería estar centrada en los gránulos de 200 a 500 micras.

## 5.2. Ensayos de fluidez

Como se ha explicado anteriormente, la fluidez del material granulado es una de las propiedades más importantes para poder conseguir un buen llenado del molde y realizar la etapa de prensado de las baldosas cerámicas de forma correcta.

Para estudiar la fluidez del material se han realizado dos ensayos distintos:

- Velocidad de flujo
- Índice de Hausner

Como señalábamos más arriba, el ensayo para determinar la velocidad de flujo consiste en colocar una determinada cantidad de material granulado en un embudo y hacerlo pasar a través de un orificio calibrado, calculando el tiempo que tarda en caer todo el material.

A partir de ahí, se calcula la velocidad como la cantidad de material por segundo que pasa a través del orificio.

El ensayo para determinar el índice de Hausner consiste en medir la diferencia entre el volumen que ocupa una determinada cantidad de material cuando éste se coloca libremente en una probeta (densidad aparente) y cuando éste se ha compactado aplicando una vibración durante varios minutos (densidad vibrada).

En la sección 4.4.2. *Ensayos de caracterización* hay una explicación más detallada de cómo se realizan estos dos experimentos relacionados con la fluidez del material granulado.

Los ensayos de fluidez se realizan con las dos muestras que han sido optimizadas en el apartado anterior y con una muestra de gres obtenida por el método de secado por atomización.

### Velocidad de flujo

En la siguiente tabla se muestran los resultados del ensayo de velocidad de flujo. En la sección de ANEXOS, se puede ver más detalladamente cada una de las mediciones obtenidas para obtener este resultado y el cálculo de errores.

	<b>V<sub>f</sub> másica (g/s)</b>
<b>E3 TR3 (x=13%, v↑, t. rotura 3min)</b>	35,7 ± 1,3
<b>E9 TR3 (x=14%, v↑, t. rotura 3min)</b>	37,1 ± 1,1
<b>GRES ATOMIZADO</b>	37,1 ± 1,3

Tabla 14: Resultados del ensayo de velocidad de flujo

A partir de los resultados obtenidos se observa que la velocidad de flujo es muy similar en los tres casos, para gránulos de un mismo tamaño.

La velocidad de flujo que tiene el material granulado es equiparable a la del gres obtenido por atomizado, por lo que en este aspecto las características del granulado son muy satisfactorias.

### Índice de Hausner

En la siguiente tabla se muestra la densidad aparente, la densidad vibrada y el índice de Hausner de cada una de las muestras, utilizando un mismo tamaño de gránulo. De el mismo modo que en el apartado anterior, en los ANEXOS se pueden ver todas las mediciones que se han realizado para llegar a estos resultados.

	<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad vibrada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de Hausner</b>
<b>E3 TR3</b>	1042	1292	1,24
<b>E9 TR3</b>	1077	1340	1,24
<b>GRES ATOMIZADO</b>	1039	1252	1,20

Tabla 15: Determinación del índice de Hausner

A partir de la tabla 15, se observa que el índice de Hausner del gres obtenido por atomización es un poco inferior al de las muestras obtenidas por granulación. También se observa una mayor densidad del material obtenido por granulación, debido a que estos gránulos son menos porosos que los del atomizado.

Los valores del índice de Hausner obtenidos indican que la fluidez del atomizado es superior a la del granulado, aunque la diferencia no es grande.

A partir de los resultados de estos dos ensayos, podemos concluir que la fluidez del material granulado es ligeramente inferior a la de un gres obtenido por atomización.

De este modo, aunque no se alcanza la fluidez del atomizado, la diferencia es tan pequeña que se puede aceptar que la fluidez del material obtenido por granulación es adecuada para llevar a cabo el prensado de las baldosas cerámicas.

### 5.3. Dureza de gránulo

Para medir la dureza de gránulo se ha realizado un ensayo de resistencia a la compresión con la máquina de ensayos universal Instron.

Como ya se ha explicado en la sección 4.4.2. *Ensayos de caracterización*, se utiliza una célula de carga de 10N que es la menor que dispone la máquina.

En este ensayo no se han utilizado las muestras del apartado anterior. En su lugar, se han utilizado tres muestras con unas condiciones de las variables de entrada muy diferentes, para poder observar cómo afectan estas variables a la dureza de gránulo. Únicamente se han tenido en cuenta la humedad y la velocidad de granulación.

También se ha medido la dureza de gránulo de una muestra de gres obtenida por atomización.

Todas las muestras se han tamizado para medir la dureza de gránulos de un mismo tamaño, en este caso 400 micras.

En la siguiente tabla se muestran las condiciones de las variables de entrada de las tres muestras obtenidas por granulación que se someten al ensayo:

Muestra	Humedad (%)	Velocidad (regulador)
P1	14	Baja
E18	14	Alta
E19	11	Alta

Tabla 16: Muestras para el ensayo de dureza de gránulo

La muestra P1 corresponde a una de las pruebas iniciales que se han realizado anteriormente al diseño de experimentos. La muestra E18 es una de las muestras del diseño de experimentos y la muestra E19 se ha obtenido expresamente para realizar este ensayo, utilizando una humedad muy baja.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para las tres muestras obtenidas por granulación y para el gres obtenido mediante secado por atomización.

En la tabla se muestra la fuerza media y el error. En la sección de ANEXOS se puede encontrar el resultado de todas las mediciones y las correspondientes gráficas con la fuerza de compresión que se experimenta con cada gránulo a medida que avanza la célula de carga.

Muestra	Fuerza (N)	Error
P1 (x↑, v↓)	0,013	0,005
E18 (x↑, v↑)	0,022	0,005
E19 (x↓, v↑)	0,025	0,004
GRES ATOMIZADO	0,018	0,003

Tabla 17: Valores de la resistencia a la compresión

A partir de estos resultados se observa que la resistencia de los gránulos obtenidos por granulación tiene valores similares a los obtenidos por atomización. Por lo tanto, en lo que se refiere a la dureza del material obtenido por granulación, se puede decir que es adecuada para la fabricación de baldosas cerámicas.

En lo que se refiere a la influencia de la humedad y la velocidad de granulación en la dureza de los gránulos, se puede concluir a partir de los resultados que con velocidades de granulación elevadas se obtiene una mayor dureza de gránulo que a bajas velocidades.

El efecto de la humedad parece menos importante, ya que para una misma velocidad de granulación, la dureza es muy similar con humedad alta y baja (muestras E18 y E19 respectivamente).

#### 5.4. Forma y esfericidad

La esfericidad de los gránulos no es una característica determinante por sí misma, pero está relacionada con otras propiedades del polvo granulado que influyen en la etapa de prensado, como son la fluidez y la homogeneidad del material.

Para estudiar la forma de los gránulos se han tomado una serie de imágenes con un microscopio para comparar el aspecto y la esfericidad de los gránulos obtenidos por atomización y los obtenidos por un proceso de granulación.

Las muestras han sido tamizadas previamente para visualizar un tamaño de gránulos bastante uniforme. Se han tamizado a 300 y 400 micras.

Para cada muestra se toman imágenes con distinta aproximación para poder analizar mejor todos los detalles de interés:

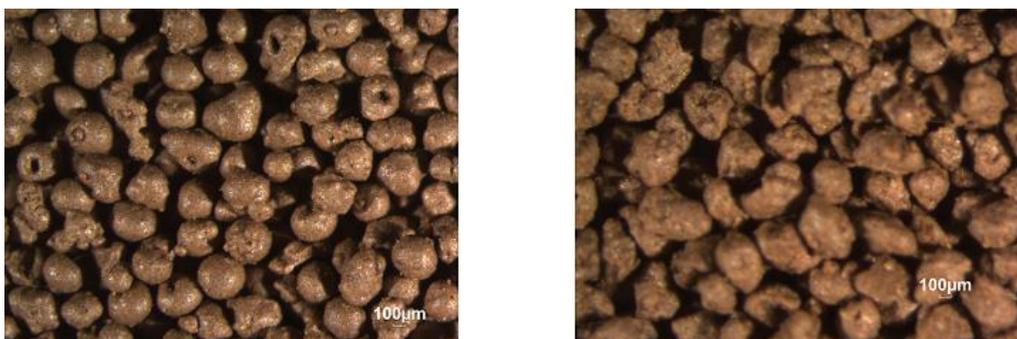


Figura 27: Vista general de un atomizado y granulado tamizado a 300 micras.

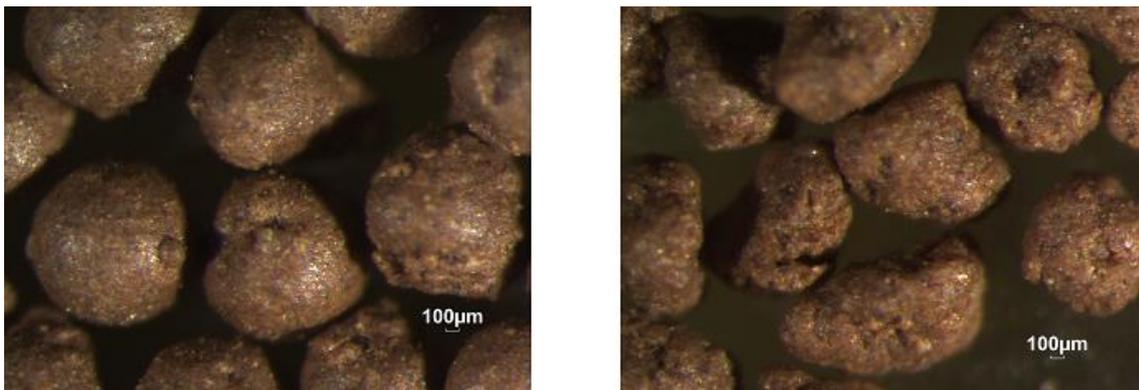
A partir de la figura 27, se puede observar claramente que los gránulos obtenidos con el proceso de secado por atomización son más esféricos que los obtenidos por granulación. Esta mayor esfericidad está relacionada con la mayor fluidez que se ha visto en los ensayos anteriores.

Otro detalle importante es el cráter que aparece en la superficie de los gránulos obtenidos por atomización y que no aparece en los del material granulado.

Este cráter característico de los gránulos se forma durante el secado por atomización al eliminar una cantidad elevada del agua que contienen los gránulos en su interior.

Al eliminarse el líquido se forman huecos en el interior de los gránulos y cráteres en la superficie. Este rasgo tan característico permite identificar fácilmente los gránulos resultantes del proceso de secado por atomización.

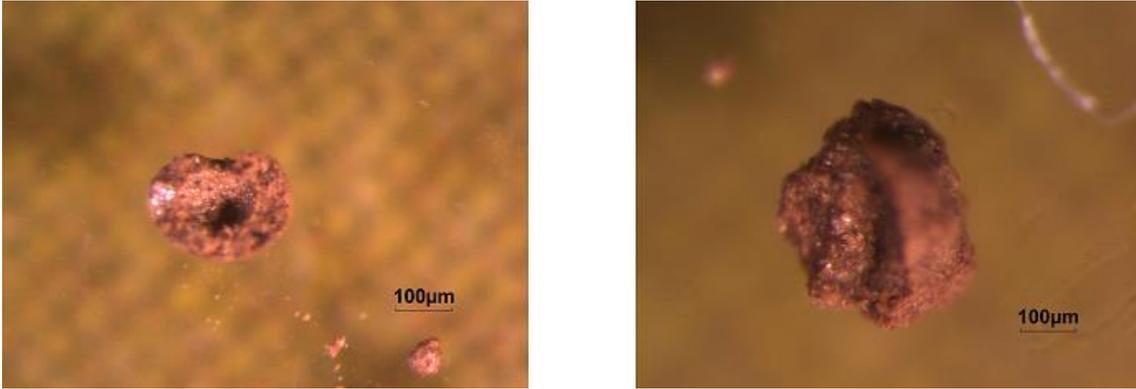
En el proceso de granulación, los gránulos se forman por aglomeración de partículas más pequeñas y por eso no se forman esos huecos internos.



*Figura 28: Vista de detalle atomizado y granulado tamizado a 400 micras.*

En la figura 28 se puede ver lo que ya se ha comentado anteriormente en la Figura 27 pero con un nivel de detalle mayor.

Se puede observar que aparte de ser más esféricos, la superficie de los gránulos obtenidos por atomización es más uniforme que la de los gránulos obtenidos por granulación.



*Figura 29: Sección de un gránulo atomizado y granulado*

En la figura 29 se puede ver con claridad lo que se ha comentado anteriormente acerca de los huecos que se forman en el interior de los gránulos obtenidos por atomización.

El hecho de que los gránulos formados por atomización sean huecos supone que tienen menor densidad que los obtenidos por granulación. Esta menor densidad de los gránulos se traduce en una menor densidad aparente del material granular obtenidos en el proceso de atomización con respecto al proceso de granulación.

## 6. Estudio de viabilidad económica

En este proyecto se han estudiado los distintos mecanismos que intervienen en el proceso de granulación con el objetivo de entender cómo influyen las distintas variables del proceso para poder optimizarlo de manera que suponga una alternativa al proceso tradicional de secado por atomización.

Ahora se va a realizar un análisis de la viabilidad de implantar el proceso de granulación en la preparación del material cerámico para la fabricación de baldosas.

Este análisis se realizará considerando volúmenes de producción similares a los de una planta media del sector cerámico de baldosas de la provincia de Castellón.

A partir de este volumen de producción estimado, se calculará la inversión necesaria para implantar el proceso de granulación y se estudiará si el ahorro energético que se consigue hace rentable la inversión.

Aparte del ahorro económico que pudiese suponer la granulación, también se realizará un pequeño estudio del impacto ambiental que tendría la implantación de este proceso y cuál sería la reducción en emisiones de dióxido de carbono que se conseguiría.

### 6.1. Hipótesis utilizadas

Para analizar la viabilidad económica de implantar un proceso de granulación que reemplace al proceso de atomización en una planta dedicada a la fabricación de baldosas cerámicas se han considerado las siguientes hipótesis:

#### **Volumen de producción**

Se ha considerado que el proceso de granulación se implementa en una planta cuyo volumen de producción de baldosas es de 6 millones de metros cuadrados anuales.

Este valor se ha obtenido teniendo en cuenta que una de las empresas más importantes de la provincia de Castellón, Argenta, tiene una producción anual de baldosas cerámicas de 20 millones de metros cuadrados.

#### **Tamaño medio de las baldosas**

Para poder determinar las necesidades de maquinaria y equipamiento, hay que conocer la cantidad de material granulado que se desea producir.

Se ha considerado que el grosor medio de las baldosas es de 1,5 centímetros y que la densidad es de  $2700 \text{ kg/m}^3$  (13). Estos valores son bastante comunes en la industria de las baldosas cerámicas.

Con estos valores de grosor y densidad se obtiene:

$$0,015m \cdot 2700 \frac{kg}{m^3} = 40,5 \frac{kg}{m^2}$$

$$6 \cdot 10^6 m^2 * 40,5 \frac{kg}{m^2} = 243000 \text{ toneladas}$$

Por lo tanto, la masa de las baldosas es de 40,5 kg/m<sup>2</sup> y la cantidad anual total de material granulado necesario será de 243.000 toneladas.

### **Precio del gas natural y electricidad**

Para calcular el ahorro económico que supone la reducción del gasto de energía térmica, se considera que el precio del gas es de 0,040905 €/kWh (14).

Este dato se ha tomado del precio del gas natural en el mes de Septiembre de 2015 para empresas con un consumo superior a los 100.000 kWh anuales.

En el caso del coste de la energía eléctrica, se considera un precio de 0,098 €/kWh correspondiente al coste de la energía eléctrica para uso industrial en el segundo semestre de 2014 (15).

### **Gastos en ingeniería**

Se ha considerado que los gastos por ingeniería son el 10% de la inversión realizada en maquinaria y otras instalaciones.

### **Consumo específico de energía en el atomizado**

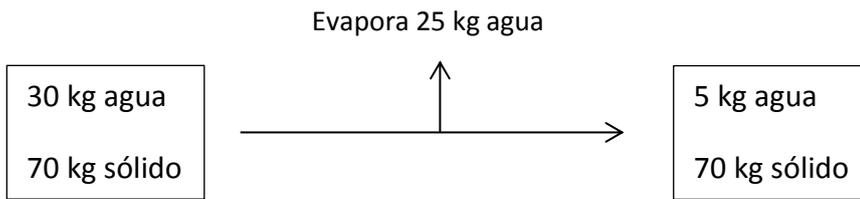
Para poder calcular el ahorro energético que se obtiene al reemplazar el proceso de secado por atomización por el proceso de granulación se ha considerado que el consumo específico de energía térmica en el secado por atomización es de 510 kWh/tonelada y el consumo en energía eléctrica es de 7,3 kWh/tonelada (16).

### **Ahorro de energía térmica con el proceso de granulación**

Cómo ya se ha comentado en este trabajo, el ahorro en el consumo de agua y energía térmica que se puede alcanzar con el proceso de granulación es de alrededor del 70% (10).

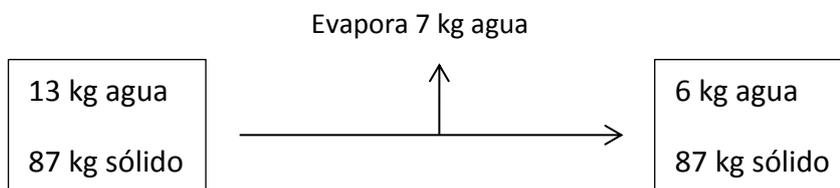
A continuación se realiza un balance másico para comprobar que este dato es razonable, en función de la cantidad de agua evaporada en el proceso de granulación y en el de atomización.

### Atomización



### Granulación

En el proceso de granulación en sí mismo no se utiliza energía térmica. Sin embargo, para poder realizar el prensado es necesaria una etapa anterior de secado para reducir la humedad hasta un 6%. El consumo de energía térmica de esta etapa es de 125 kWh/tonelada (16).



### Reducción agua evaporada

$$\frac{25 \text{ kg} - 7 \text{ kg}}{25 \text{ kg}} = 0,72 \rightarrow 72\%$$

La reducción en la cantidad de agua que hay que evaporar es del 72%. Teniendo en cuenta los consumos específicos de energía térmica, la reducción de energía térmica sería de alrededor del 75%.

Para estudiar la viabilidad económica de implantar este proceso y teniendo un pequeño margen de seguridad, se considera que el ahorro en energía térmica es del 70%.

### **Consumo de energía eléctrica en la granulación**

Como se acaba de explicar, hay que tener en cuenta el consumo de energía tanto del proceso de granulación como de la posterior etapa de secado.

El consumo eléctrico en el secado es de 11,2 kWh/tonelada (16).

En el caso del consumo eléctrico del proceso de granulación, se considerará que es de 60 kWh/tonelada. Este valor se ha estimado a partir de consumos típicos de granuladoras de tipo industrial, con capacidad para granular varios cientos, incluso miles, de kilos de material. El consumo combinado del proceso de granulación y secado será de 71,2 kWh/tonelada.

## 6.2. Cálculos realizados

A continuación se muestran las expresiones utilizadas para calcular los distintos conceptos de los resultados del estudio económico (sección 6.4. *Resultados*) derivados de la implantación del proceso de granulación.

**Beneficio bruto:** es la diferencia entre los ingresos, en este caso el ahorro de energía, y los gastos. Se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Beneficio } (\text{€}) = \text{Total gastos} - \text{Ahorro energía}$$

**Beneficio neto:** es el beneficio una vez ya han sido pagados los correspondientes impuestos. Se considera que los impuestos son un 30% del beneficio bruto.

$$\text{Beneficio neto } (\text{€}) = 0,7 \cdot \text{Beneficio bruto}$$

**Flujo de caja:** es la diferencia entre los cobros y pagos de una empresa en un período determinado. Se calcula como la diferencia entre el beneficio neto y la amortización.

$$\text{Cash flow } (\text{€}) = \text{Beneficio neto} - \text{Amortización}$$

**VAN (valor actual neto):** es el valor actualizado de todos los flujos de caja de cada año de vida del proyecto.

$$\text{VAN } (\text{€}) = -\text{Inversión} + \sum_{n=0}^N \text{Flujo de caja}_n$$

**TIR (tasa interna de rentabilidad):** es la tasa de actualización de los precios que hace que el VAN sea cero. Es un indicativo de la rentabilidad de la inversión, de forma que cuando mayor es el TIR mayor es la rentabilidad.

$$i | - \text{Inversión} + \sum_{n=0}^N \frac{\text{Flujo de caja}_n}{(1 - i)^n} = 0$$

**Flujo de caja medio:** es el promedio de los flujos de caja.

**Período de retorno:** es el número de años en los cuales se recupera la inversión inicial vía facturación. Se calcula como la relación entre la inversión total y el flujo de caja medio.

$$\text{Período de retorno (años)} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Flujo de caja medio}}$$

### 6.3. Inversión

Para implementar el proceso de granulación en una planta con ese volumen de producción se realizan las siguientes inversiones:

#### **Maquinaria**

Las máquinas necesarias para realizar el proceso de granulación son los equipos de molturación de los materiales por vía seca, las granuladoras de alta cizalla para realizar la granulación del polvo y el secadero para reducir la humedad del granulado.

Es necesario disponer de suficientes máquinas para poder acometer la producción necesaria de material granulado, la cual es de unas 28 toneladas la hora. Además, hay que tener en cuenta que las máquinas no pueden estar operativas siempre, por lo que hay que considerar un cierto margen.

Se utilizarán dos molinos pendulares con una capacidad de producción de 20 toneladas por hora. También se utilizará una trituradora y un molino de martillos con suficiente capacidad de producción.

Las granuladoras industriales tienen una capacidad de unos 1000 litros. Teniendo en cuenta que el proceso de granulación dura unos pocos minutos se ha considerado que cada una de estas máquinas tiene una capacidad de producción de 4 toneladas por hora, de modo que se necesitan siete granuladoras en funcionamiento para poder producir lo suficiente. En total se dispondrán de 10 granuladoras para tener un cierto margen frente a imprevistos.

También se ha tenido en cuenta el coste del secadero para reducir la humedad del material granulado hasta valores adecuados para el prensado.

#### **Almacenamiento**

Se utilizan depósitos de acero inoxidable para almacenar el material molturado y el material granulado. Se considera que se debe poder almacenar una cantidad de material equivalente a la producción de dos semanas, en este caso unas 10.000 toneladas.

#### **Otros sistemas**

Hay que realizar la instalación de sistemas auxiliares para que puedan funcionar correctamente las máquinas.

Estos sistemas incluyen el sistema eléctrico así como un sistema para llevar agua destilada y otro para llevar aire a presión a las granuladoras, además de todo lo necesario para los equipos de molturación y secado.

En la siguiente tabla se muestra la inversión necesaria. Las inversiones se han estimado a partir de los precios de venta que se han encontrado de los distintos equipos y teniendo en cuenta cuál era su capacidad de producción.

Concepto	Inversión (€)
Granuladoras	2.000.000
Secadero	700.000
Molturación	1.000.000
Sistema de almacenamiento	500.000
Otros sistemas	200.000
Ingeniería (10%)	440.000
<b>Total</b>	<b>4.840.000</b>

Tabla 18: Presupuesto de inversión

## 6.4. Gastos

En el apartado de gastos se tienen en cuenta únicamente aquellos gastos o ahorros que se tienen con la implantación del proceso de granulación en relación con el proceso de atomización.

Se distingue entre gastos fijos y gastos variables:

### Gastos fijos

- Personal: con la implantación del proceso de granulación se requiere contratar a personal adicional ya que la producción de un atomizador ahora se realiza con siete granuladoras. Para determinar el personal necesario se considera que se necesitan cuatro operarios en todo momento para controlar las granuladoras. Con tres turnos diarios y teniendo en cuenta días festivos, se contratarán a catorce trabajadores adicionales. Se ha considerado un coste anual de cada operario de 20.000 euros (seguridad social incluida).
- Amortización: la amortización de la inversión se realiza a 10 años y se tienen en cuenta todos los conceptos de la Tabla 18 excepto los gastos de ingeniería.

En la siguiente tabla se muestran los gastos fijos anuales:

Concepto	Coste (€)
Personal	280.000
Amortización	440.000
<b>Total</b>	<b>720.000</b>

Tabla 19: Gastos fijos anuales

## Gastos variables

En el apartado de gastos variables sólo se tendrá en cuenta el gasto en energía.

En este caso se calculará el coste de la energía con el proceso de secado por atomización y el ahorro que se obtiene con la implantación del proceso de granulación considerando como se ha dicho anteriormente en el apartado 6.1. *Hipótesis utilizadas* que se reduce un 70% el gasto en energía térmica.

En la siguiente tabla se muestra el gasto energético anual con el proceso de atomización y el ahorro/gasto adicional que se consigue con la granulación:

Concepto	Coste (€)
Energía térmica atomización	5.069.357
<b>Ahorro energía térmica granulación (70%)</b>	<b>3.548.550</b>
Energía eléctrica atomización	173.842
Energía eléctrica granulación	1.695.557
<b>Gasto adicional energía eléctrica</b>	<b>1.521.715</b>

Tabla 20: Gastos variables anuales

El cálculo del coste de la energía consumida se ha calculado de la siguiente forma:

$$E. \text{Térmica atomizado} = 243 \cdot 10^3 \text{ ton} \cdot 510 \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \cdot 0,040905 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 5.069.357 \text{ €}$$

$$E. \text{Eléctrica atomizado} = 243 \cdot 10^3 \text{ ton} \cdot 7,3 \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \cdot 0,098 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 173.842 \text{ €}$$

$$E. \text{Eléctrica granulado} = 243 \cdot 10^3 \text{ ton} \cdot 71,2 \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \cdot 0,098 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1.695.557 \text{ €}$$

## 6.5. Resultados

En la siguiente tabla se muestran los resultados del estudio de viabilidad económica. En esta tabla solo se incluyen los 6 primeros años. En la sección 4 de los anexos está el estudio económico a 10 años.

PRESUPUESTO DE INVERSION								
		€	AMORTIZACIÓN	AMORTIZACIÓN ANUAL				
MAQUINARIA		370000	10 AÑOS	370000 €				
INSTALACIONES		200000	10 AÑOS	200000 €				
ALMACENAMIENTO		500000	10 AÑOS	500000 €				
		4400000		4400000 €				
INGENIERIA	10% INV	440000						
		-4840000						
GASTOS								
<b>GASTOS FIJOS</b>	SUELDO		AÑO1	AÑO2	AÑO3	AÑO4	AÑO5	AÑO6
PERSONAL	280000		280000	280000	280000	280000	280000	280000
AMORTIZACIÓN			440000	440000	440000	440000	440000	440000
<b>TOTAL GASTOS FIJOS</b>			720000	720000	720000	720000	720000	720000
			-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	-720000
<b>GASTOS VARIABLES</b>								
ENERGÍA ATOMIZACIÓN	5069380		5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380
<b>AHORRO ENERGÍA TÉRMICA</b>	70%		3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566
E. ELÉCTRICA ATOMIZACIÓN	173842		173842	173842	173842	173842	173842	173842
E. ELÉCTRICA GRANULACIÓN	1695557		1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557
<b>COSTE ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	1521715		1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715
RESULTADOS								
<b>BENEFICIO</b>			1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	1306851
<b>BENEFICIO NETO</b>			914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7
<b>CASH FLOW</b>			1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	1354796
<b>VAN</b>			-3045204	-1690409	-335613	1019183	2373979	3728774
<b>TIR</b>			37%					
<b>PERÍODO DE RETORNO</b>	3,247722							
<b>CASH FLOW MEDIO</b>	1354796							

Tabla 21: Resumen del estudio de viabilidad económica

Como se puede ver en la Tabla 21, el período de retorno de la inversión es de 3,25 años, por lo tanto, se trata de una inversión que es económicamente rentable.

En el siguiente gráfico se muestra un resumen del estudio económico:

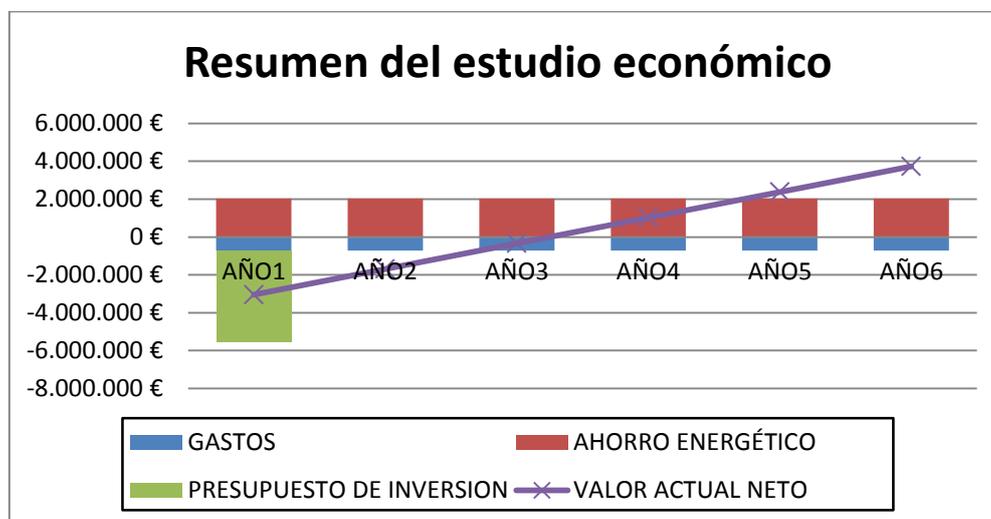


Figura 30: Resumen del estudio económico

## 7. Estudio del impacto ambiental

Se ha visto que con la técnica de la granulación se consigue una reducción muy importante en el consumo de energía térmica. Esto tiene un gran impacto en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de manera que la granulación es un proceso mucho más respetuoso con el medio ambiente que el proceso de secado por atomización.

La reducción anual en las emisiones de CO<sub>2</sub> que se conseguiría implementando el proceso de granulación sería de 21.861 toneladas, teniendo en cuenta un factor de emisión de 0,252 kg CO<sub>2</sub>/ kWh gas natural (17).

A continuación se muestran los cálculos realizados:

- Atomización

$$243 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 510 \frac{\text{kWh}}{1000 \text{ kg}} \cdot 0,252 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} = 31.230 \text{ toneladas CO}_2$$

- Reducción

Como se ha explicado anteriormente en el estudio de viabilidad económica, la reducción en el consumo de gas natural es del 70%. Por lo tanto la reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> será:

$$\text{Reducción emisiones CO}_2 = 0,7 \cdot 31230 = 21.861 \text{ toneladas CO}_2$$

La implantación de este proceso más sostenible energéticamente y medioambientalmente puede permitir la producción de baldosas con un etiquetado ecológico.

El hecho de utilizar un etiquetado ecológico de las baldosas presenta ciertas ventajas que las hacen más atractivas:

- Muestra el compromiso de la empresa con el medio ambiente y mejora la imagen corporativa
- Es un elemento diferenciador dentro del sector
- Puede ser una ventaja competitiva, especialmente frente a clientes sensibles con el medio ambiente

Otro aspecto muy importante relacionado con el impacto ambiental es la reducción en el consumo de agua que se consigue con el proceso de granulación. Teniendo en cuenta que la cantidad de agua en el secado por atomización suele ser del 30% y que en la granulación se suele añadir entre un 11-13% de agua, la reducción en el consumo de agua que se consigue es de alrededor del 60%.



## 8. Conclusiones

A continuación se citan las conclusiones más importantes obtenidas en este estudio:

### Energéticas y medioambientales

- Con el proceso de granulación se requiere una cantidad de agua mucho menor que con el proceso tradicional de secado por atomización (aproximadamente un 60% menos).

Esta reducción de las necesidades de agua para la obtención del material granulado se traduce en un gran ahorro de energía térmica, debido a que no hay que eliminar tanta cantidad de agua, y como consecuencia de ello una reducción en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

En el siguiente gráfico se puede ver el consumo en energía térmica y las emisiones de dióxido de carbono en la producción de una tonelada de material granulado.

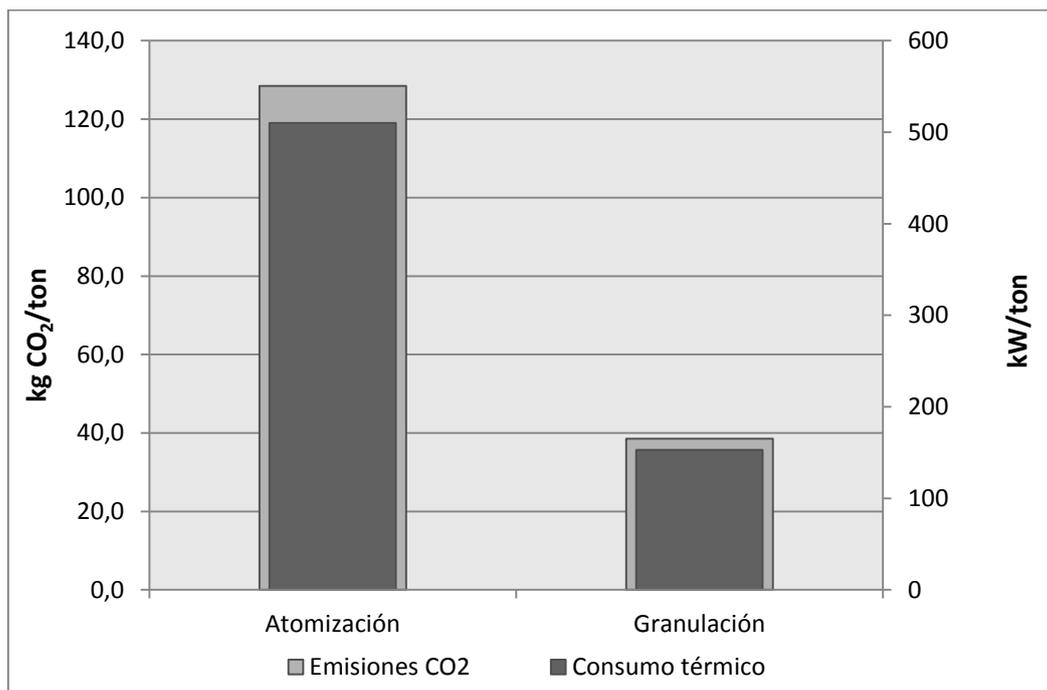


Figura 31: Comparativa consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>

### Características del granulado

- Mediante el análisis estadístico de la varianza se ha podido determinar que el efecto de las tres variables de entrada estudiadas (humedad, velocidad de granulación y tiempo) es positivo en lo que se refiere a la formación de gránulos de mayor tamaño.

Es decir, cuanto mayor es el valor de cualquiera de las variables se forman más gránulos gruesos y menos finos.

Este análisis estadístico de los resultados indica que la variable más significativa y la que tiene una mayor influencia sobre el proceso es la humedad del material, seguida por el tiempo y por último la velocidad.

- A partir de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos y su posterior análisis, se ha optimizado el proceso con el objetivo de maximizar la cantidad de gránulos de tamaño entre 200 y 500 micras, ya que éste es el tamaño óptimo para el prensado de las baldosas.

Con la optimización del proceso se consigue incrementar considerablemente la cantidad de gránulos de este tamaño, sin embargo no se llega a alcanzar la distribución de tamaños óptima.

En la siguiente figura se muestra una comparación de la distribución objetivo y la distribución conseguida. La distribución de la izquierda corresponde a la obtenida mediante el proceso de atomización. La distribución de tamaño óptima para un material granulado sería igual pero muy ligeramente desplazada hacia la derecha.

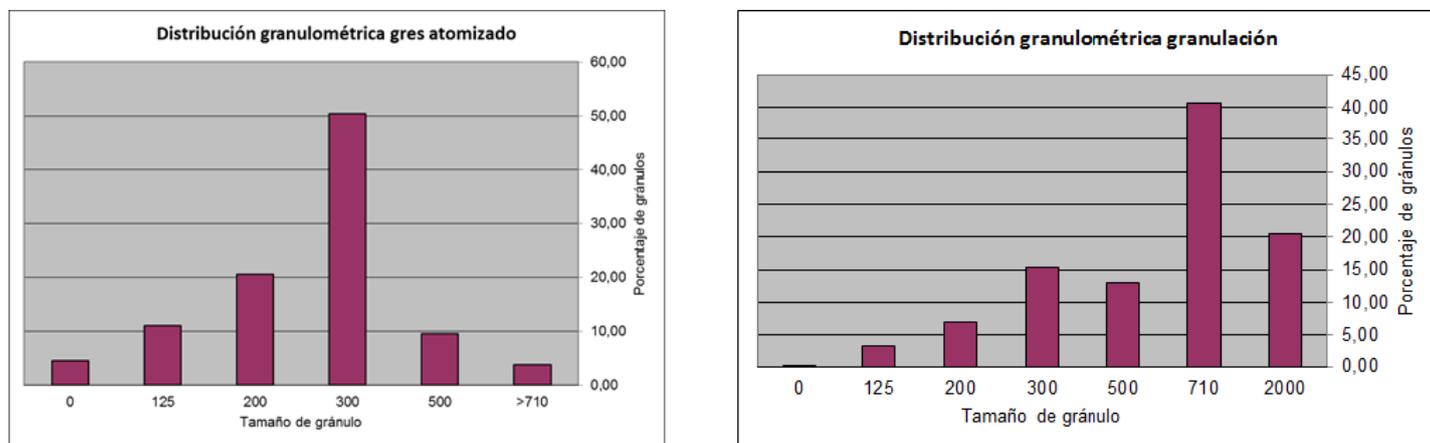


Figura 32: Comparación distribución óptima y distribución obtenida

Como se puede observar en la Figura 32, la distribución obtenida mediante el proceso de granulación está desplazada hacia tamaños de gránulo algo mayores que los que corresponderían a una distribución óptima para realizar la posterior etapa de prensado.

El hecho de no haber conseguido una distribución de tamaños óptima puede deberse al material utilizado (arcilla villar). Se ha observado una tendencia del material a formar gránulos de tamaño grande salvo en condiciones de

humedad baja, pero en este caso una parte importante del material no se granula.

- Para los ensayos de fluidez realizados, la velocidad de flujo es similar en todas las muestras, mientras que el ensayo de determinación del índice de Hausner muestra que la fluidez del atomizado es ligeramente superior. Una mayor fluidez permite un mejor llenado del molde para la etapa de prensado.
- En el caso del ensayo de dureza de gránulo, la resistencia de los gránulos obtenidos por atomización es similar a la de los gránulos obtenidos por granulación. Este ensayo muestra que la velocidad es la variable del proceso que más influye en la resistencia de los gránulos, de forma que a mayor velocidad mayor es la resistencia de los mismos.
- Los gránulos obtenidos por atomización son considerablemente más esféricos que los que se obtienen a partir del proceso de granulación. Esta mayor esfericidad y uniformidad del granulado obtenido por atomización es importante para conseguir un buen llenado del molde y una densidad uniforme en las baldosas ya prensadas.

En resumen, las propiedades del material cerámico obtenido con el proceso de granulación son ligeramente inferiores a las del obtenido con el proceso de secado por atomización y que la distribución de tamaños óptima que se consigue en el secado por atomización resulta complicado conseguirla con la granulación.

Esto sugiere que el ámbito de aplicación más lógico para implementar el proceso de granulación actualmente podría ser la fabricación de baldosas cerámicas en aquellos casos en que no se requiera de una calidad de las mismas muy elevada.

Hay que tener en cuenta que el proceso de atomización lleva implementado en la industria varias décadas. Las mejores propiedades de los gránulos obtenidos por atomización se deben en parte a que se trata de un proceso que está muy optimizado y estandarizado.

La granulación es un proceso que no se ha utilizado anteriormente porque los equipos de molturación por vía seca no eran capaces de reducir suficientemente el tamaño de las partículas. Actualmente este problema no existe y los equipos de granulación por vía seca son capaces de reducir el tamaño de partícula igual que los de vía húmeda.

Con la implantación de esta técnica a nivel industrial se conseguiría avanzar en la optimización del proceso para conseguir cada vez unos mejores resultados.

### **Económicas**

- En el estudio de viabilidad económica se ha comprobado la rentabilidad de implantar el proceso de granulación en una planta destinada a la fabricación de baldosas cerámicas con una producción anual de 6 millones de metros cuadrados de baldosas. Este estudio muestra que se conseguiría un retorno de la inversión en poco más de tres años, gracias al enorme ahorro en los costes de la energía térmica.

Con este trabajo se ha demostrado la viabilidad técnica y económica de implantar el proceso de granulación en la fabricación de baldosas cerámicas.

Los resultados obtenidos, junto con las características de este proceso, hacen que la granulación sea una técnica atractiva, especialmente para aquellas empresas que deseen utilizar un proceso productivo más sostenible con el medio ambiente.

## 9. Líneas futuras

En este trabajo se ha estudiado el proceso de granulación en sí mismo, analizando cómo se produce el crecimiento de los gránulos y que efecto tienen las variables del proceso en este crecimiento.

También se han analizado las propiedades más importantes del material granulado para realizar el prensado de las baldosas cerámicas.

Sin embargo, hay otros estudios relacionados con el proceso de granulación que resultarían interesantes como complemento para este trabajo o que podrían ser una continuación lógica de este proyecto.

- Sería interesante estudiar cómo afecta la implementación del proceso de molienda vía seca y granulación en las posteriores etapas del proceso de fabricación de baldosas cerámicas.

De este modo se podrían estudiar los siguientes aspectos:

- Etapa de prensado y características físico-mecánicas de las baldosas cerámicas (resistencia mecánica, compactación, porosidad...).
- Comportamiento y transformaciones que se producen en las baldosas durante la etapa de cocción.
- Desarrollo de un estudio de impacto ambiental e identificación de nuevas técnicas para mejorar la sostenibilidad del proceso.
- Análisis de defectos hallados en baldosas asociados con el método de preparación del material granulado.

A continuación se muestran otras posibles líneas de estudio:

- Este estudio se ha realizado utilizando un equipo de granulación con una capacidad de cinco litros, por lo que sería importante llevar a cabo un estudio similar con una granuladora de tipo industrial para poder comprobar si los resultados se pueden escalar para volúmenes de producción de plantas industriales.
- En este trabajo se ha visto que resulta complicado alcanzar una distribución de tamaños óptima con la arcilla villar que se ha utilizado. Otra posible vía de estudio sería analizar cómo afectan las propiedades del material utilizado en el proceso de granulación.

En este sentido, utilizando como material para el proceso de granulación una mezcla de 50% de tiesto crudo y 50% de tiesto cocido, y con el mismo equipo de granulación, se consigue una distribución más próxima al óptimo, por lo que las propiedades del material influyen considerablemente en el proceso.

En la figura 33 se muestra la distribución granulométrica de este material obtenido con unas condiciones de humedad y velocidad de granulación bajas.

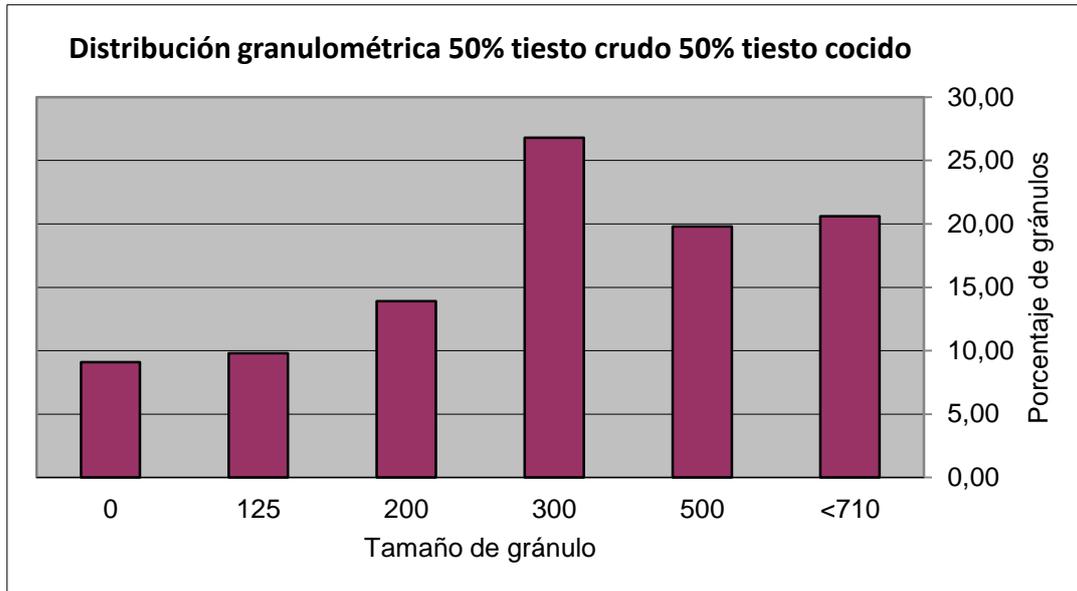


Figura 33: Distribución granulométrica mezcla de 50% tiesto cocido y 50% tiesto crudo

## 10. Bibliografía:

1. Cerámica de España. [En línea] [Citado el: 22 de 7 de 2015.]  
<http://www.tileofspain.com/procesoFabricacion.aspx?lang=es-ES>.
2. **ASCER**. Construmática. [En línea] [Citado el: 22 de 7 de 2015.]  
[http://www.construmatica.com/construpedia/Proceso\\_de\\_Fabricación\\_de\\_Baldosas\\_Cerámicas](http://www.construmatica.com/construpedia/Proceso_de_Fabricación_de_Baldosas_Cerámicas).
3. MadeHow. [En línea] [Citado el: 22 de 7 de 2015.]  
<http://www.madehow.com/Volume-1/Ceramic-Tile.html>.
4. **Agencia Valenciana de la Energía**. Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en el sector de la cerámica artística, de uso y técnica de la Comunidad Valenciana. pág. 51.
5. *La evolución energética del sector español de baldosas cerámicas*. **E. Monfort, A. Mezquita, E. Vaquer, G. Mallol, D. Gabaldón-Estevan**. Mayo-Junio de 2014, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, pág. 115. ISSN 0366-3175.
6. **Eliseo Monfort, Ana Mezquita, Gustavo Mallol, Rocío Granel y Eva Vaquer**. Informe sectorial de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas. *Estudio energético sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana*. pág. 21.
7. Preciogas. [En línea] [Citado el: 13 de Agosto de 2015.]  
<http://preciogas.com/evolucion>.
8. **Eliseo Monfort, Ana Mezquita, Gustavo Mallol, Rocío Granel y Eva Vaquer**. Informe sectorial de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas. *Estudio energético sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana*. pág. 38.
9. **Agencia Valenciana de la Energía**. *Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en el sector de la cerámica artística, de uso y técnica de la Comunidad Valenciana*. pág. 135.
10. CEVISAMA. *ITC estudia la reducción del consumo energético en la cerámica*. [En línea] 3 de 9 de 2014. [Citado el: 23 de 7 de 2015.]  
<http://cevisama.feriavalencia.com/itc-estudia-la-reduccion-del-consumo-energetico-en-la-ceramica/>.
11. **SACMI, Asociación Española de Técnicos Cerámicos**. *Tecnología cerámica aplicada*. Castellón de la Plana : Faenza Editrice Ibérica S.L., 2004. págs. 126-131. ISBN: 84-87683-29-0.

12. *Características de polvos cerámicos para prensado*. **J.L. Amoros Albaro, A. Blasco Fuentes, J. E. Enrique Navarro, F. Negre Medall**. 1, s.l. : Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 1987, Vol. 26, pág. 33.
13. **CatStones**. Tabla de conversiones de baldosas. [En línea]  
[http://www.catstones.es/media/uploads/productos/71/TABLA\\_CONVERSIONES\\_BALDOSAS\\_\(PESO-SUPERFICIE\).pdf](http://www.catstones.es/media/uploads/productos/71/TABLA_CONVERSIONES_BALDOSAS_(PESO-SUPERFICIE).pdf).
14. Preciogas. [En línea] <http://preciogas.com/tarifas/gas-natural-3-4>.
15. **Ministerio de Industria, Energía y Turismo**. Precio neto de la electricidad para uso doméstico y uso industrial. [En línea] [http://www.minetur.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/DatosEstadisticos/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/IV\\_12.pdf](http://www.minetur.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/DatosEstadisticos/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/IV_12.pdf).
16. **Eliseo Monfort, Ana Mezquita, Gustavo Mallol, Rocío Granel y Eva Vaquer**. *Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas*. pág. 51.
17. *Factores de emisión de CO2 y factores de paso a energía primaria*. 2014.

# **ANEXOS**



## Índice de anexos

<b>1. Distribuciones granulométricas.....</b>	<b>83</b>
1.1. Pruebas iniciales.....	83
1.2. Diseño de experimentos .....	86
1.3. Optimización del proceso .....	91
<b>2. Ensayos de fluidez .....</b>	<b>95</b>
2.1. Velocidad de flujo .....	95
2.2. Índice de Hausner .....	96
<b>3. Dureza de gránulo .....</b>	<b>99</b>
<b>4. Estudio económico .....</b>	<b>105</b>



## 1. Distribuciones granulométricas

### 1.1. Pruebas iniciales

A continuación se muestran las distribuciones granulométricas de los ensayos realizados en la sección 4.5. *Ensayos iniciales*.

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,78	385,07	44,29	85,98	340,78	385,06	44,28	87,93
500	312,86	315,08	2,22	4,31	312,86	314,64	1,78	3,53
300	331,89	333,26	1,37	2,66	331,89	332,93	1,04	2,07
200	315,52	316,11	0,59	1,15	315,52	316,01	0,49	0,97
125	303,26	303,94	0,68	1,32	303,26	303,81	0,55	1,09
0			2,36	4,58			2,22	4,41

*Tabla 1: Resultados distribución granulométrica experimento P1*

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,78	381,09	40,31	78,72	340,78	380,45	39,67	77,12
500	312,86	318,07	5,21	10,17	312,86	318,21	5,35	10,40
300	331,89	335,80	3,91	7,64	331,89	335,99	4,10	7,97
200	315,52	316,80	1,28	2,50	315,52	317,07	1,55	3,01
125	303,26	303,66	0,40	0,78	303,26	303,74	0,48	0,93
0			0,10	0,20			0,29	0,56

*Tabla 2: Resultados distribución granulométrica experimento P2*

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,78	367,97	27,19	54,22	340,78	369,43	28,65	56,58
500	312,86	318,48	5,62	11,21	312,86	318,63	5,77	11,39
300	331,89	338,14	6,25	12,46	331,89	337,90	6,01	11,87
200	315,52	319,75	4,23	8,43	315,52	319,72	4,20	8,29
125	303,26	306,71	3,45	6,88	303,26	306,21	2,95	5,83
0			3,41	6,80			3,06	6,04

*Tabla 3: Resultados distribución granulométrica experimento P3*

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,78	354,21	13,43	57,89	340,78	353,52	12,74	55,25
500	312,86	314,72	1,86	8,02	312,86	314,90	2,04	8,85
300	331,89	333,98	2,09	9,01	331,89	333,94	2,05	8,89
200	315,52	317,16	1,64	7,07	315,52	317,17	1,65	7,16
125	303,26	304,87	1,61	6,94	303,26	304,99	1,73	7,50
0			2,57	11,08			2,85	12,36

*Tabla 4: Resultados distribución granulométrica experimento P4*

A continuación se muestran las distribuciones granulométricas de los ensayos para comparar el método de vertido utilizando. En estos ensayos, a diferencia del resto, únicamente se ha tomado una muestra de cada uno de ellos.

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	389,17	48,34	96,26
500	313,16	313,88	0,72	1,44
300	332,11	332,69	0,58	1,16
200	315,55	315,87	0,32	0,63
125	303,29	303,49	0,20	0,39
0			0,06	0,12

*Tabla 5: Resultados distribución granulométrica vertido directo a los 2 minutos*

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	389,46	48,63	96,84
500	313,16	313,87	0,71	1,41
300	332,11	332,51	0,40	0,80
200	315,55	315,65	0,10	0,19
125	303,29	303,33	0,04	0,08
0			0,34	0,68

*Tabla 6: Resultados distribución granulométrica vertido directo a los 4 minutos*

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	389,12	48,29	96,16
500	313,16	314,19	1,03	2,05
300	332,11	332,58	0,47	0,93
200	315,55	315,65	0,10	0,20
125	303,29	303,32	0,03	0,06
0			0,31	0,61

Tabla 7: Resultados distribución granulométrica vertido directo a los 6 minutos

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	375,00	34,17	68,04
500	313,16	319,37	6,21	12,36
300	332,11	337,23	5,12	10,19
200	315,55	318,18	2,63	5,23
125	303,29	304,52	1,23	2,45
0			0,87	1,73

Tabla 8: Resultados distribución granulométrica vertido directo a los 8 minutos

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	363,43	22,60	45,00
500	313,16	318,45	5,29	10,54
300	332,11	336,22	4,11	8,19
200	315,55	318,52	2,97	5,92
125	303,29	303,74	0,45	0,89
0			14,79	29,46

Tabla 9: Resultados distribución granulométrica pulverizado a los 2 minutos

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	376,27	35,44	70,56
500	313,16	315,75	2,59	5,16
300	332,11	334,03	1,92	3,82
200	315,55	317,05	1,50	2,98
125	303,29	304,97	1,68	3,35
0			7,10	14,14

Tabla 10: Resultados distribución granulométrica pulverizado a los 4 minutos

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	376,86	36,03	71,75
500	313,16	315,93	2,77	5,52
300	332,11	334,36	2,25	4,49
200	315,55	317,27	1,72	3,42
125	303,29	305,09	1,80	3,58
0			5,64	11,24

Tabla 11: Resultados distribución granulométrica pulverizado a los 6 minutos

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
700	340,83	360,01	19,18	38,19
500	313,16	317,89	4,73	9,42
300	332,11	336,42	4,31	8,59
200	315,55	318,94	3,39	6,76
125	303,29	307,14	3,85	7,66
0			14,75	29,38

Tabla 12: Resultados distribución granulométrica pulverizado a los 8 minutos

## 1.2. Diseño de experimentos

A continuación se muestran las distribuciones granulométricas de los ensayos realizados en la sección 4.6. *Diseño de experimentos* y utilizados posteriormente para analizar los resultados.

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	412,78	6,07	12,00	406,71	411,90	5,19	10,20
710	386,42	400,07	13,65	26,98	386,42	398,14	11,72	23,04
500	444,95	448,77	3,82	7,55	444,95	448,72	3,77	7,41
300	331,85	336,82	4,97	9,82	331,85	336,35	4,50	8,85
200	325,31	329,48	4,17	8,24	325,31	328,79	3,48	6,84
125	303,28	306,61	3,33	6,58	303,28	306,54	3,26	6,41
0			14,59	28,83			18,95	37,25

Tabla 13: Resultados distribución granulométrica experimento E1

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	416,97	10,26	19,52	406,71	416,87	10,16	20,27
710	386,42	400,90	14,48	27,55	386,42	401,94	15,52	30,96
500	444,95	448,30	3,35	6,37	444,95	448,44	3,49	6,96
300	331,85	336,44	4,59	8,73	331,85	336,28	4,43	8,84
200	325,31	329,19	3,88	7,38	325,31	328,70	3,39	6,76
125	303,28	306,16	2,88	5,48	303,28	305,67	2,39	4,77
0			13,12	24,96			10,75	21,44

Tabla 14: Resultados distribución granulométrica experimento E2

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	412,46	5,75	10,94	406,71	413,26	6,55	12,46
710	386,42	399,91	13,49	25,67	386,42	401,99	15,57	29,62
500	444,95	451,05	6,10	11,61	444,95	446,87	1,92	3,65
300	331,85	337,00	5,15	9,80	331,85	337,94	6,09	11,59
200	325,31	331,43	6,12	11,64	325,31	328,93	3,62	6,89
125	303,28	306,11	2,83	5,38	303,28	307,19	3,91	7,44
0			13,12	24,96			14,90	28,35

Tabla 15: Resultados distribución granulométrica experimento E3

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	410,00	3,29	6,35	406,71	409,70	2,99	5,82
710	386,42	396,90	10,48	20,23	386,42	396,60	10,18	19,81
500	444,95	448,60	3,65	7,05	444,95	448,30	3,35	6,52
300	331,85	336,60	4,75	9,17	331,85	337,20	5,35	10,41
200	325,31	329,40	4,09	7,90	325,31	330,30	4,99	9,71
125	303,28	307,00	3,72	7,18	303,28	306,90	3,62	7,04
0			21,82	42,12			20,92	40,70

Tabla 16: Resultados distribución granulométrica experimento E4

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	409,80	3,09	6,01	406,71	411,50	4,79	9,09
710	386,42	397,70	11,28	21,95	386,42	399,80	13,38	25,39
500	444,95	448,60	3,65	7,10	444,95	448,20	3,25	6,17
300	331,85	336,60	4,75	9,24	331,85	336,50	4,65	8,82
200	325,31	330,10	4,79	9,32	325,31	329,30	3,99	7,57
125	303,28	306,70	3,42	6,65	303,28	306,00	2,72	5,16
0			20,42	39,73			19,92	37,80

Tabla 17: Resultados distribución granulométrica experimento E5

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	413,40	6,69	13,12	406,71	410,90	4,19	8,15
710	386,42	403,40	16,98	33,29	386,42	402,50	16,08	31,28
500	444,95	448,50	3,55	6,96	444,95	448,70	3,75	7,30
300	331,85	336,60	4,75	9,31	331,85	336,90	5,05	9,82
200	325,31	329,20	3,89	7,63	325,31	329,60	4,29	8,35
125	303,28	306,10	2,82	5,53	303,28	306,20	2,92	5,68
0			12,32	24,16			15,12	29,42

Tabla 18: Resultados distribución granulométrica experimento E6

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	420,50	13,79	26,72	406,71	422,00	15,29	29,63
710	386,42	404,50	18,08	35,04	386,42	404,90	18,48	35,81
500	444,95	448,60	3,65	7,07	444,95	448,20	3,25	6,30
300	331,85	336,70	4,85	9,40	331,85	336,20	4,35	8,43
200	325,31	328,40	3,09	5,99	325,31	328,20	2,89	5,60
125	303,28	305,00	1,72	3,33	303,28	305,10	1,82	3,53
0			6,42	12,44			5,52	10,70

Tabla 19: Resultados distribución granulométrica experimento E7

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	417,20	10,49	20,49	406,71	416,90	10,19	19,75
710	386,42	404,60	18,18	35,51	386,42	405,50	19,08	36,98
500	444,95	449,40	4,45	8,69	444,95	449,60	4,65	9,01
300	331,85	337,40	5,55	10,84	331,85	337,80	5,95	11,53
200	325,31	329,10	3,79	7,40	325,31	329,10	3,79	7,34
125	303,28	305,60	2,32	4,53	303,28	305,50	2,22	4,30
0			6,42	12,54			5,72	11,09

Tabla 20: Resultados distribución granulométrica experimento E8

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	417,94	11,23	22,28	406,71	415,26	8,55	16,96
710	386,42	409,57	23,15	45,93	386,42	408,03	21,61	42,88
500	444,95	452,41	7,46	14,80	444,95	448,19	3,24	6,43
300	331,85	337,06	5,21	10,34	331,85	338,34	6,49	12,88
200	325,31	326,87	1,56	3,10	325,31	330,33	5,02	9,96
125	303,28	303,92	0,64	1,27	303,28	305,88	2,60	5,16
0			1,15	2,28			2,89	5,73

Tabla 21: Resultados distribución granulométrica experimento E9

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	418,73	12,02	20,84	406,71	424,71	18,00	33,51
710	386,42	400,90	14,48	25,11	386,42	400,40	13,98	26,02
500	444,95	449,17	4,22	7,32	444,95	448,51	3,56	6,63
300	331,85	337,88	6,03	10,46	331,85	336,59	4,74	8,82
200	325,31	330,08	4,77	8,27	325,31	328,72	3,41	6,35
125	303,28	306,63	3,35	5,81	303,28	305,63	2,35	4,37
0			12,80	22,20			7,68	14,30

Tabla 22: Resultados distribución granulométrica experimento E10

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	422,70	15,99	30,54	406,71	420,24	13,53	25,57
710	386,42	400,39	13,97	26,68	386,42	400,61	14,19	26,81
500	444,95	448,88	3,93	7,51	444,95	449,25	4,30	8,13
300	331,85	337,01	5,16	9,85	331,85	337,54	5,69	10,75
200	325,31	328,85	3,54	6,76	325,31	329,32	4,01	7,58
125	303,28	305,78	2,50	4,77	303,28	306,14	2,86	5,40
0			7,27	13,88			8,34	15,76

Tabla 23: Resultados distribución granulométrica experimento E11

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	418,22	11,51	22,50	406,71	420,09	13,38	24,69
710	386,42	401,01	14,59	28,52	386,42	403,41	16,99	31,35
500	444,95	449,37	4,42	8,64	444,95	449,65	4,70	8,67
300	331,85	337,79	5,94	11,61	331,85	337,58	5,73	10,57
200	325,31	329,62	4,31	8,43	325,31	329,40	4,09	7,55
125	303,28	306,64	3,36	6,57	303,28	306,31	3,03	5,59
0			7,02	13,72			6,28	11,59

Tabla 24: Resultados distribución granulométrica experimento E12

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	416,27	9,56	18,36	406,71	417,01	10,30	19,90
710	386,42	396,72	10,30	19,78	386,42	397,07	10,65	20,58
500	444,95	448,51	3,56	6,84	444,95	448,49	3,54	6,84
300	331,85	337,26	5,41	10,39	331,85	336,84	4,99	9,64
200	325,31	329,61	4,30	8,26	325,31	329,45	4,14	8,00
125	303,28	306,35	3,07	5,90	303,28	306,42	3,14	6,07
0			15,86	30,46			15,00	28,98

Tabla 25: Resultados distribución granulométrica experimento E13

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	419,72	13,01	24,16	406,71	418,98	12,27	23,21
710	386,42	397,40	10,98	20,39	386,42	397,96	11,54	21,83
500	444,95	448,37	3,42	6,35	444,95	448,80	3,85	7,28
300	331,85	336,93	5,08	9,43	331,85	337,03	5,18	9,80
200	325,31	329,32	4,01	7,45	325,31	329,23	3,92	7,41
125	303,28	306,35	3,07	5,70	303,28	306,21	2,93	5,54
0			14,28	26,52			13,18	24,93

Tabla 26: Resultados distribución granulométrica experimento E14

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	416,96	10,25	19,30	406,71	415,90	9,19	17,55
710	386,42	401,78	15,36	28,92	386,42	403,59	17,17	32,79
500	444,95	449,03	4,08	7,68	444,95	449,39	4,44	8,48
300	331,85	337,27	5,42	10,20	331,85	337,23	5,38	10,28
200	325,31	329,05	3,74	7,04	325,31	329,12	3,81	7,28
125	303,28	306,63	3,35	6,31	303,28	306,14	2,86	5,46
0			10,92	20,56			9,51	18,16

Tabla 27: Resultados distribución granulométrica experimento E15

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	420,05	13,34	24,15	406,71	422,63	15,92	30,52
710	386,42	401,96	15,54	28,14	386,42	402,31	15,89	30,46
500	444,95	449,35	4,40	7,97	444,95	449,09	4,14	7,94
300	331,85	337,87	6,02	10,90	331,85	337,02	5,17	9,91
200	325,31	329,79	4,48	8,11	325,31	328,52	3,21	6,15
125	303,28	306,68	3,40	6,16	303,28	305,73	2,45	4,70
0			8,05	14,58			5,39	10,33

Tabla 28: Resultados distribución granulométrica experimento E16

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	417,90	11,19	20,87	406,71	420,64	13,93	26,03
710	386,42	404,31	17,89	33,37	386,42	405,32	18,90	35,31
500	444,95	449,83	4,88	9,10	444,95	449,78	4,83	9,02
300	331,85	338,33	6,48	12,09	331,85	338,14	6,29	11,75
200	325,31	329,85	4,54	8,47	325,31	329,21	3,90	7,29
125	303,28	306,75	3,47	6,47	303,28	306,03	2,75	5,14
0			5,16	9,63			2,92	5,46

Tabla 29: Resultados distribución granulométrica experimento E17

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,71	417,98	11,27	20,71	406,71	420,98	14,27	26,26
710	386,42	413,85	27,43	50,41	386,42	413,87	27,45	50,52
500	444,95	450,09	5,14	9,45	444,95	449,36	4,41	8,12
300	331,85	337,16	5,31	9,76	331,85	336,21	4,36	8,02
200	325,31	328,51	3,20	5,88	325,31	327,57	2,26	4,16
125	303,28	305,20	1,92	3,53	303,28	304,29	1,01	1,86
0			0,14	0,26			0,58	1,07

Tabla 30: Resultados distribución granulométrica experimento E18

### 1.3. Optimización del proceso

A continuación se muestran las distribuciones granulométricas de los ensayos realizados en la sección 5.1.2. *Optimización del proceso*.

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,93	429,20	22,27	42,74	406,93	422,94	16,01	29,86
710	386,67	395,13	8,46	16,24	386,67	408,01	21,34	39,81
500	445,14	448,98	3,84	7,37	445,14	448,47	3,33	6,21
300	387,23	391,90	4,67	8,96	387,23	390,84	3,61	6,73
200	315,72	319,25	3,53	6,78	315,72	318,18	2,46	4,59
125	303,43	306,24	2,81	5,39	303,43	305,74	2,31	4,31
0			6,52	12,51			4,55	8,49

Tabla 31: Resultados distribución granulométrica experimento E3 TR1

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,93	419,06	12,13	24,03	406,93	421,43	14,50	26,85
710	386,67	400,29	13,62	26,98	386,67	401,90	15,23	28,20
500	445,14	449,23	4,09	8,10	445,14	449,58	4,44	8,22
300	387,23	393,20	5,97	11,83	387,23	393,27	6,04	11,18
200	315,72	320,35	4,63	9,17	315,72	320,39	4,67	8,65
125	303,43	308,16	4,73	9,37	303,43	307,97	4,54	8,41
0			5,31	10,52			4,59	8,50

Tabla 32: Resultados distribución granulométrica experimento E3 TR2

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,93	414,87	7,94	14,56	406,93	416,38	9,45	17,50
710	386,67	402,04	15,37	28,19	386,67	402,52	15,85	29,35
500	445,14	450,21	5,07	9,30	445,14	450,08	4,94	9,15
300	387,23	395,09	7,86	14,42	387,23	394,68	7,45	13,80
200	315,72	321,95	6,23	11,43	315,72	321,38	5,66	10,48
125	303,43	309,51	6,08	11,15	303,43	308,78	5,35	9,91
0			5,97	10,95			5,30	9,81

Tabla 33: Resultados distribución granulométrica experimento E3 TR3

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,93	420,59	13,66	27,03	406,93	418,91	11,98	22,33
710	386,67	409,49	22,82	45,15	386,67	406,56	19,89	37,08
500	445,14	449,85	4,71	9,32	445,14	450,21	5,07	9,45
300	387,23	392,48	5,25	10,39	387,23	393,94	6,71	12,51
200	315,72	318,36	2,64	5,22	315,72	320,38	4,66	8,69
125	303,43	304,70	1,27	2,51	303,43	307,18	3,75	6,99
0			0,19	0,38			1,58	2,95

Tabla 34: Resultados distribución granulométrica experimento E9 TR1

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,93	419,03	12,10	23,50	406,93	421,72	14,79	27,81
710	386,67	406,35	19,68	38,23	386,67	409,29	22,62	42,53
500	445,14	451,25	6,11	11,87	445,14	450,93	5,79	10,89
300	387,23	394,88	7,65	14,86	387,23	393,52	6,29	11,83
200	315,72	319,51	3,79	7,36	315,72	318,30	2,58	4,85
125	303,43	305,28	1,85	3,59	303,43	304,47	1,04	1,96
0			0,30	0,58			0,08	0,15

Tabla 35: Resultados distribución granulométrica experimento E9 TR2

Tamiz Luz malla ( $\mu\text{m}$ )	Tara (g)	Ensayo 1			Tara (g)	Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)		T+m (g)	masa (g)	masa (%)
2000	406,93	418,87	11,94	21,36	406,93	418,08	11,15	19,63
710	386,67	407,90	21,23	37,98	386,67	411,17	24,50	43,13
500	445,14	452,34	7,20	12,88	445,14	452,64	7,50	13,20
300	387,23	395,82	8,59	15,37	387,23	395,97	8,74	15,39
200	315,72	320,16	4,44	7,94	315,72	319,19	3,47	6,11
125	303,43	305,81	2,38	4,26	303,43	304,81	1,38	2,43
0			0,12	0,21			0,06	0,11

Tabla 36: Resultados distribución granulométrica experimento E9 TR3

Tamiz Luz malla (mm)	Tara (g)	Ensayo 1			Ensayo 2		
		T+m (g)	masa (g)	masa (%)	T+m (g)	masa (g)	masa (%)
710	386,53	388,98	2,45	5,63	389,41	2,88	6,64
500	409,24	413,22	3,98	9,14	413,86	4,62	10,65
300	387,14	398,37	11,23	25,79	398,45	11,31	26,07
200	316,26	326,60	10,34	23,74	326,38	10,12	23,33
125	304,21	313,78	9,57	21,97	312,99	8,78	20,24
0	368,65	374,63	5,98	13,73	374,32	5,67	13,07

*Tabla 37: Resultados distribución granulométrica gres atomizado*



## 2. Ensayos de fluidez

En esta sección se incluyen todos los ensayos de fluidez llevados a cabo con los resultados obtenidos en cada caso y el desarrollo realizado para obtener el error que presentan los resultados:

### 2.1. Velocidad de flujo

Como se ha comentado en la sección de análisis de resultados de la memoria de este trabajo, se estudia la velocidad de flujo de las muestras E3 TR3, E9 TR3 y una muestra de un gres obtenido por atomización.

La velocidad de flujo es la relación entre la masa de material utilizada en el ensayo y el tiempo que tarda todo el material en caer por el orificio del embudo que se utiliza para realizar el ensayo.

$$V_F \text{másica} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la velocidad de flujo másica para las tres mediciones realizadas con cada muestra:

Ensayo	E3 TR3			E9 TR3			GRES ATOMIZADO		
	masa (g)	tiempo (s)	V <sub>F</sub> másica (g/s)	masa (g)	tiempo (s)	V <sub>F</sub> másica (g/s)	masa (g)	tiempo (s)	V <sub>F</sub> másica (g/s)
1	179,94	4,99	36,1	149,12	4,02	37,1	182,45	4,96	36,8
2	179,36	4,99	35,9	149,02	4,01	37,2	182,17	4,82	37,8
3	179,28	5,11	35,1	148,98	4,01	37,1	182,12	4,94	36,9

Tabla 38: Valores de la velocidad de flujo

A pesar de que el dispositivo para realizar este ensayo se controla de manera manual, se puede ver que la diferencia en los tiempos tomados es muy pequeña, por lo que los errores obtenidos serán relativamente pequeños.

En la siguiente tabla se muestra el desarrollo del cálculo de los errores con los tres ensayos que se han realizado con cada muestra:

	E3 TR3	E9 TR3	GRES
$\epsilon_L$	1,10	1,10	1,10
n	3	3	3
n-1	2	2	2
Probabilidad (%)	95	95	95
a	0,05	0,05	0,05
t <sub>STUDENT</sub>	4,303	4,303	4,303
Desviación STD	0,533	0,022	0,561
error	<b>1,28</b>	<b>1,10</b>	<b>1,30</b>

Tabla 39: Cálculo de errores en la velocidad de flujo

El error se ha calculado de la siguiente forma:

$$error = \sqrt{\varepsilon_L^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)^2}$$

Donde  $\varepsilon_L$  corresponde a un error propio del equipo de medida,  $\sigma$  es la desviación típica,  $t$  la  $t$  de Student y  $n$  el número de ensayos.

La  $t$  de Student se obtiene directamente desde Excel a partir de la función *DISTR.T.INV*( $\alpha;n-1$ ), donde  $\alpha$  es la probabilidad y  $n-1$  los grados de libertad (el número de ensayos menos uno).

La desviación típica se calcula como:

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2$$

Donde  $n$  es el número de ensayos,  $x$  el valor de la velocidad de flujo para cada ensayo y  $\bar{x}$  es la media aritmética de las velocidades de flujo.

Con las mediciones realizadas y los errores obtenidos podemos conocer la velocidad de flujo media y el error de cada una de las muestras.

	<b>E3 TR3</b>	<b>E9 TR3</b>	<b>GRES ATOMIZADO</b>
<b>V<sub>F</sub> másica (g/s)</b>	35,70 ± 1,28	37,14 ± 1,10	37,15 ± 1,30

Tabla 40: Resultados del ensayo de velocidad de flujo

## 2.2. Índice de Hausner

Para determinar el índice de Hausner se compara el volumen que ocupa el material granulado vertido libremente en una probeta y el volumen que tiene ese mismo material cuando se compacta por la acción de un movimiento vibratorio.

De este modo, el índice de Hausner es igual a la relación entre la densidad vibrada ( $\rho_F$ ) y la densidad aparente ( $\rho_0$ ).

$$I_{HAUSNER} = \frac{\rho_F}{\rho_0}$$

La densidad aparente y la densidad vibrada se obtiene como:

$$\rho_0 = \frac{masa}{volumen\ inicial}$$

$$\rho_F = \frac{\text{masa}}{\text{volumen final}}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los tres ensayos realizados con cada una de las muestras.

	E3 TR3			E9 TR3			GRES ATOMIZADO		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
<b>Masa (g)</b>	103,52	105,57	103,46	107,7	107,48	107,86	103,91	104,22	103,64
<b>Volumen inicial (cm3)</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>Volumen final (cm3)</b>	80	82	80	80	80	81	83	83	83
<b>Tiempo vibrado (min)</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	1035	1056	1035	1077	1075	1079	1039	1042	1036
$\rho_F$ (kg/m <sup>3</sup> )	1294	1287	1293	1346	1344	1332	1252	1256	1248
$I_{\text{HAUSNER}}$	1,25	1,22	1,25	1,25	1,25	1,23	1,20	1,21	1,20

Tabla 41: Resultados del ensayo para determinar el índice de Hausner

A partir de los resultados de la Tabla 41, se obtienen los valores promedio de la densidad aparente, la densidad vibrada y el índice de Hausner.

	E3 TR3	E9 TR3	GRES
$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	1042	1077	1039
$\rho_F$ (kg/m <sup>3</sup> )	1292	1340	1252
$I_{\text{HAUSNER}}$	1,24	1,24	1,20

Tabla 42: Valores promedio del ensayo de determinación del índice de Hausner



### 3. Dureza de gránulo

El ensayo de dureza se realiza con la máquina de ensayos universal Instron. Se realiza un ensayo de resistencia a la compresión en el que la célula de carga se acerca lentamente hacia un gránulo y cuando entra en contacto lo comprime y lo rompe.

Para cada muestra, se realizan alrededor de 12 ensayos con gránulos distintos. Cada uno de estos ensayos son una serie, y en cada serie la máquina registra unos 200 valores de la fuerza que está experimentando la célula de carga.

Inicialmente se realiza un ensayo sin ninguna carga para tener los valores de fuerza que sufre la célula de carga sin presencia de un gránulo. Esta fuerza se debe a las distintas fuerzas de atracción que aparecen entre las propias piezas de la máquina.

A los valores obtenidos en cada serie se les restará los valores obtenidos en el ensayo sin carga, para así tener únicamente la fuerza que se genera por la resistencia del gránulo. Al resultado de este tratamiento de los datos se les da el nombre de series corregidas.

Para obtener la dureza de gránulo se toma el valor de fuerza máximo dentro de cada serie de una misma muestra. A partir de estos valores se calcula la fuerza media y se calcula el error.

Para calcular la fuerza media y el error no se tienen en cuenta aquellas series cuyo valor de fuerza máxima sea muy diferente al del resto de las muestras.

El error se obtiene como:

$$error = \frac{\sigma \cdot t}{\sqrt{n}}$$

Donde  $\sigma$  es la desviación típica,  $t$  la  $t$  de Student y  $n$  el número de ensayos.

La  $t$  de Student se obtiene directamente desde Excel a partir de la función *DISTR.T.INV(0,05;n)*, donde 0,05 es la probabilidad y  $n$  los grados de libertad (el número de ensayos en este caso).

La desviación típica se calcula como:

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2$$

Donde  $n$  es el número de ensayos,  $x$  el valor de la fuerza para cada ensayo y  $\bar{x}$  es la media aritmética de las fuerzas.

A continuación se muestran los resultados del ensayo de compresión para cada una de las muestras analizadas:

### Experimento E18

Serie	Fmáx (Kgf)
1	0,019959
2	0,038848
3	-0,000512
4	0,016921
5	0,014233
6	0,016918
7	0,028586
8	0,022988
9	0,017731
10	0,015528
11	0,026994
12	0,017189
13	0,029725

Serie	Fmáx (Kgf)	DESVEST	Media	T STUDENT	ERROR
1	0,019959	0,00746	0,02214	2,179	0,005
2	0,038848				
4	0,016921				
5	0,014233				
6	0,016918				
7	0,028586				
8	0,022988				
9	0,017731				
10	0,015528				
11	0,026994				
12	0,017189				
13	0,029725				

Tabla 43: Resultados ensayo de resistencia a la compresión de la muestra E18

La serie 3, que está marcada en rojo, no se ha tenido en cuenta ya que el resultado obtenido no tiene sentido.

A continuación se muestra la representación de cada una de las series de los ensayos realizados.

### Experimento 18

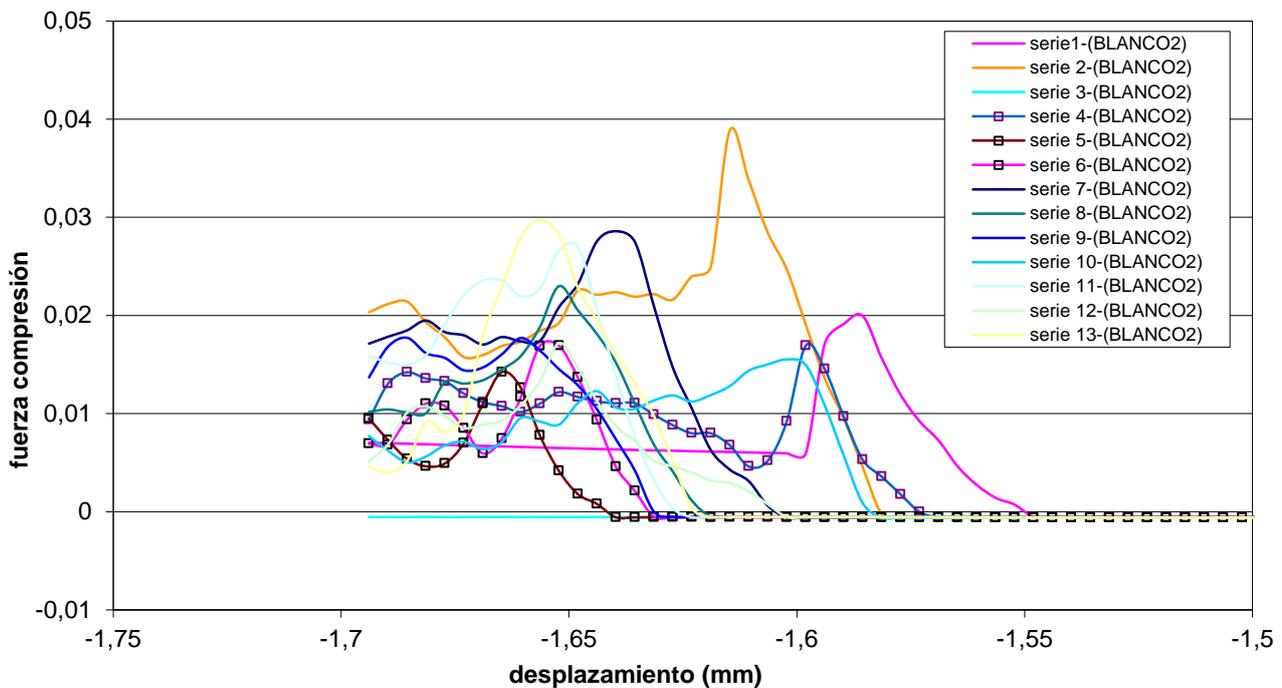


Figura 1: Ensayo de resistencia a la compresión de la muestra E18

### Experimento E19

Serie	Fmáx (Kgf)
1	0,005473
2	0,022035
3	0,015072
4	0,027065
5	0,027971
6	0,044324
7	0,027624
8	0,005334
9	0,020813
10	0,028626
11	0,032328
12	0,024874

Serie	Fmáx (Kgf)	DESVEST	Media	T STUDENT	ERROR
2	0,022035	0,00514	0,025	2,2622	0,004
3	0,015072				
4	0,027065				
5	0,027971				
7	0,027624				
9	0,020813				
10	0,028626				
11	0,032328				
12	0,024874				

Tabla 44: Resultados ensayo de resistencia a la compresión de la muestra E19

Las series 1 y 8 no se han tenido en cuenta porque la fuerza máxima medida es muy pequeña, mientras que en la serie 6 la fuerza máxima es muy superior a la media.

A continuación se muestra la representación de cada una de las series de los ensayos realizados.

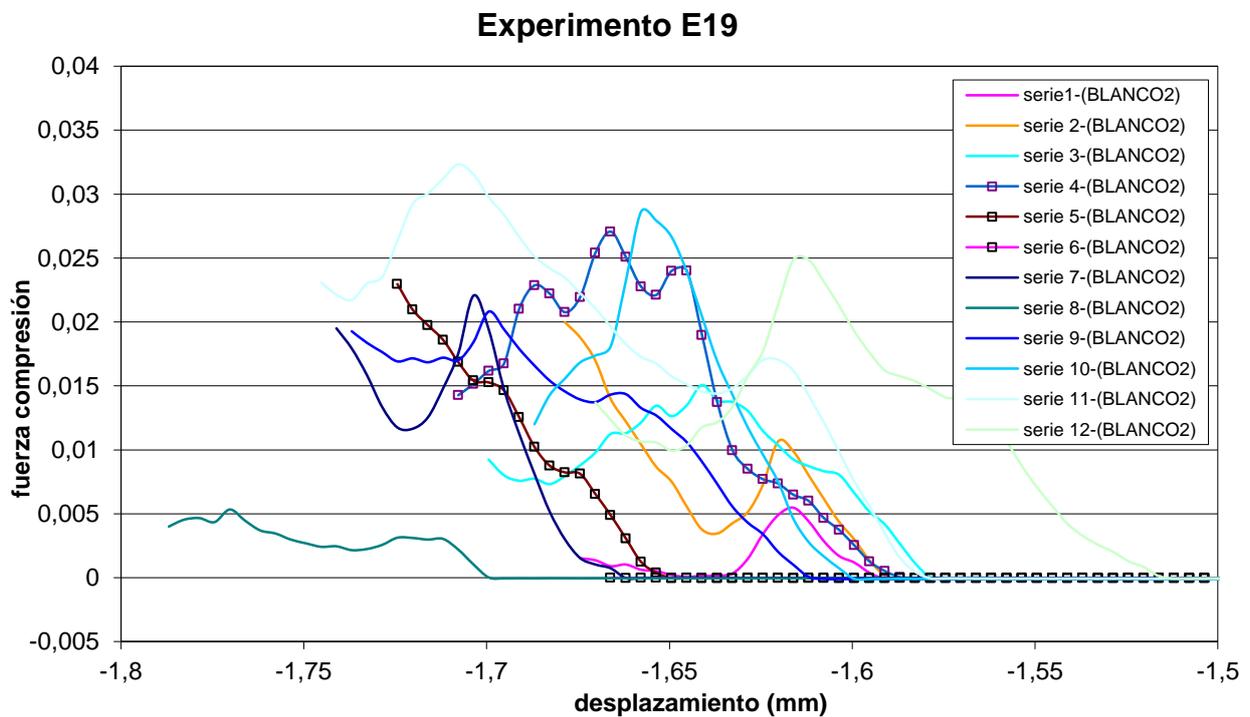


Figura 2: Ensayo de resistencia a la compresión de la muestra E19

## Experimento P1

Serie	Fmáx (Kgf)
1	0,008308
2	0,008981
3	0,020274
4	0,010579
5	0,027732
6	0,008034
7	0,009852
8	0,011580
9	0,012757
10	0,034245
11	0,038954
12	0,023066
13	0,006321

Serie	Fmáx (Kgf)	DESVEST	Media	T STUDENT	ERROR
1	0,008308	0,00703	0,0134	2,201	0,005
2	0,008981				
3	0,020274				
4	0,010579				
5	0,027732				
6	0,008034				
7	0,009852				
8	0,011580				
9	0,012757				
12	0,023066				
13	0,006321				

Tabla 45: Resultados ensayo de resistencia a la compresión de la muestra P1

Se desprecian las series 10 y 11 porque la fuerza máxima se va muy por encima de la que se genera con el resto de los gránulos.

A continuación se muestra la representación de cada una de las series de los ensayos realizados.

## Experimento P1

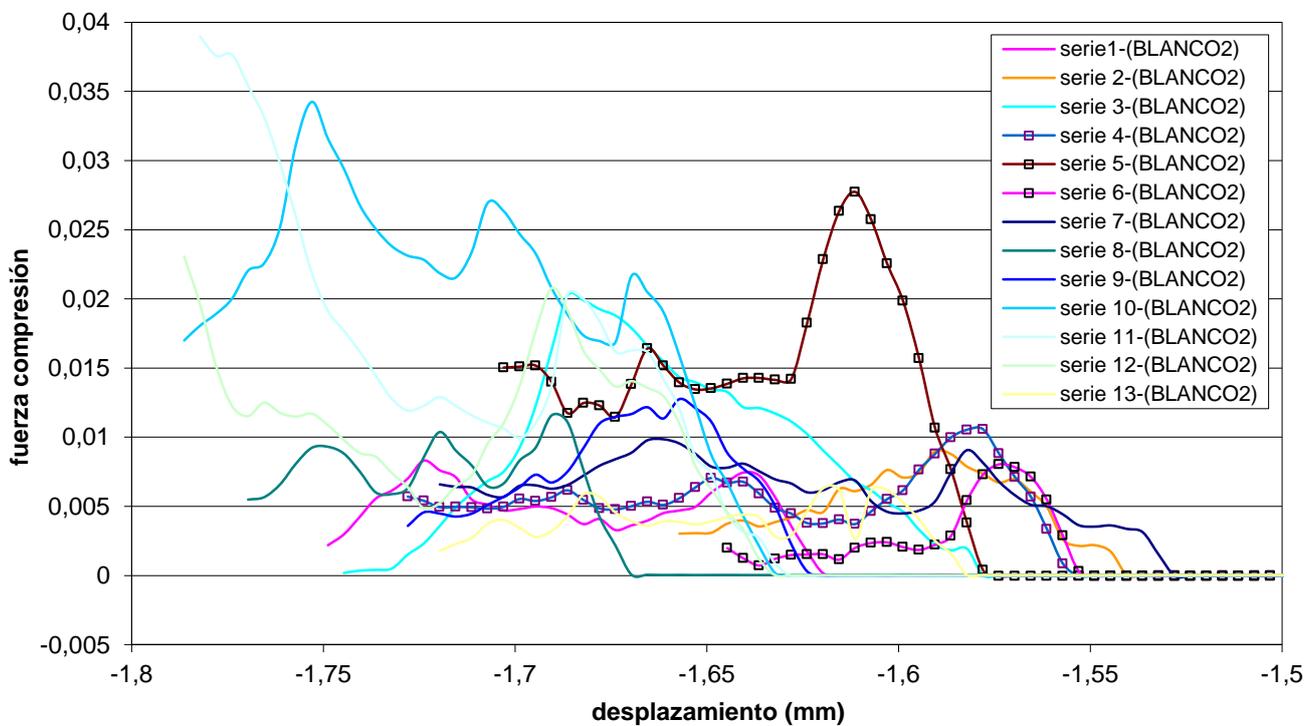


Figura 3: Ensayo de resistencia a la compresión de la muestra P1

## Gres Atomizado

Serie	Fmáx (Kgf)	DESVEST	Media	T STUDENT	ERROR
1	0,011697	0,00421	0,0177	2,201	0,003
2	0,015376				
3	0,020769				
4	0,023804				
5	0,021949				
6	0,016062				
7	0,016979				
8	0,016129				
9	0,020917				
10	0,011578				
11	0,018896				

Tabla 45: Resultados ensayo de resistencia a la compresión de una muestra de gres

En este caso no se descarta ninguna de las series ya que todos los resultados de fuerza son similares.

A continuación se muestra la representación de cada una de las series de los ensayos realizados.

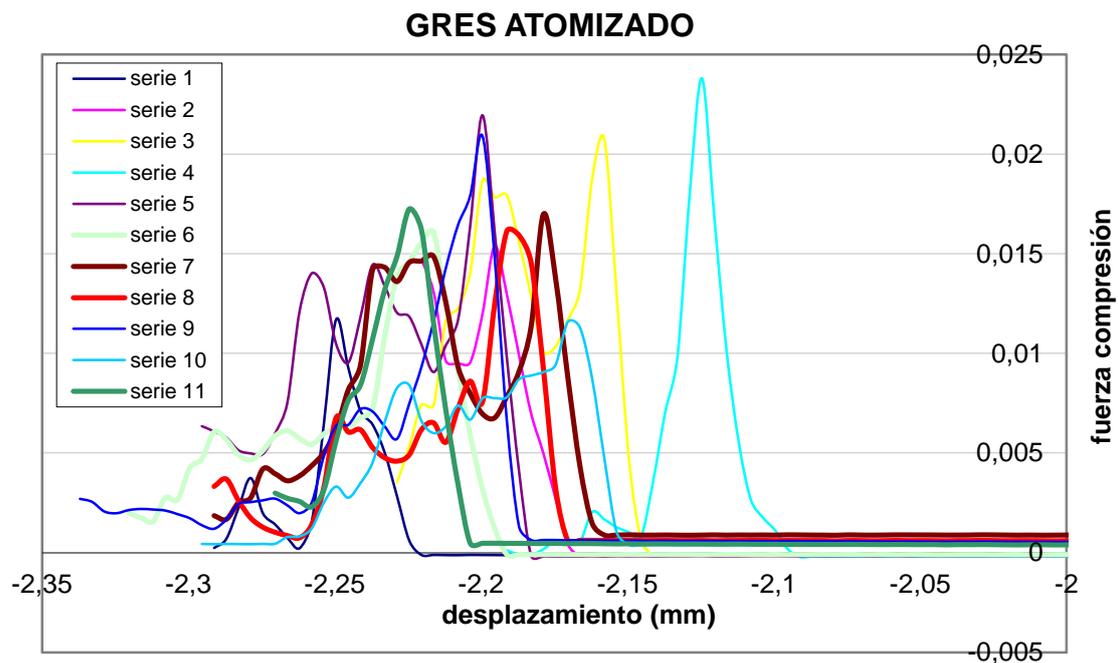


Figura 4: Ensayo de resistencia a la compresión de una muestra de gres



## 4. Estudio económico

<b>PRESUPUESTO DE INVERSION</b>												
	€	AMORTIZACIÓN		AMORTIZACIÓN ANUAL								
MAQUINARIA	3700000	10 AÑOS	370000 €									
INSTALACIONES	200000	10 AÑOS	20000 €									
ALMACENAMIENTO	500000	10 AÑOS	50000 €									
	4400000		440000 €									
INGENIERIA	10% INV 440000											
	-4840000											
<b>GASTOS</b>												
<b>GASTOS FIJOS</b>	SUELDO	AÑO1	AÑO2	AÑO3	AÑO4	AÑO5	AÑO6	AÑO7	AÑO8	AÑO9	AÑO10	
PERSONAL	280000	280000	280000	280000	280000	280000	280000	280000	280000	280000	280000	
AMORTIZACIÓN		440000	440000	440000	440000	440000	440000	440000	440000	440000	440000	
<b>TOTAL GASTOS FIJOS</b>		720000	720000	720000	720000	720000	720000	720000	720000	720000	720000	
		-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	-720000	
<b>GASTOS VARIABLES</b>												
ENERGÍA ATOMIZACIÓN	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	5069380	
<b>AHORRO ENERGÍA TÉRMICA</b>	70%	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	3548566	
E. ELÉCTRICA ATOMIZACIÓN	173842	173842	173842	173842	173842	173842	173842	173842	173842	173842	173842	
E. ELÉCTRICA GRANULACIÓN	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	1695557	
<b>COSTE ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	1521715	
<b>RESULTADOS</b>												
<b>BENEFICIO</b>		1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	1306851	
<b>BENEFICIO NETO</b>		914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	914795,7	
<b>CASH FLOW</b>		1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	1354796	
<b>VAN</b>		-3045204	-1690409	-335613	1019183	2373979	3728774	5083570	6438366	7793161	9147957	
<b>TIR</b>		37%										
<b>PERÍODO DE RETORNO</b>	3,247722											
<b>CASH FLOW MEDIO</b>	1354796											